

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Práce s programem CST Studio Microwave

CST Studio Microwave Guide

Zadání bakalářské práce

Student:

René Gruszkowski

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Práce s programem CST Studio Microwave
CST Studio Microwave Guide

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Program CST Studio Microwave je profesionální software na modelování rozložení elektromagnetického pole. Student má za úkol popsat práci s programem a vytvořit názornou příručku do výuky předmětu Radiokomunikační technika.

Vypracovaná práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popis programu CST Studio Microwave.
2. Popište prostředí Design Studia a možnosti impedančního přizpůsobení antény.
3. Vytvoření ukázkového modelu antény včetně komentované video-ukázky.
4. Vytvořit názornou příručku práce s programem.

Seznam doporučené odborné literatury:

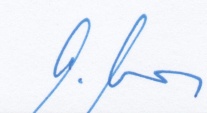
Literatura dle doporučení vedoucího práce.
Příručka CST Studio Microwave.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

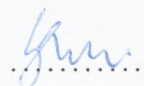

doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

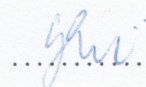
Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 *Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava*.

V Ostravě 15. dubna 2017



Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 15. dubna 2017



Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za vedení a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Abstrakt

CST Studio Suite je profesionální software pro elektromagnetickou simulaci založený na letech výzkumu a vývoje. Tato bakalářská práce vznikla za účelem podpory studentů při práci s CST Studií. Obsahuje stručný obecný popis CST Studia a jeho modulů se zaměřením na modul Microwave Studio. Možnosti provozu Microwave studia, jeho vlastnosti a pracovní postup v něm. Rovněž se zabývá typy řešičů, které Microwave Studio využívá a pro jakou situaci je konkrétní řešič vhodný.

Klíčová slova: Bakalářská práce, CST Studio, Microwave Studio, Návod návrhu antény

Abstract

CST Studio Suite is a professional software for electromagnetic simulation based on years of research and development. This bachelor thesis was created as a guide for students working with CST Studio. It contains a brief description of CST Studio and his modules, especially Microwave Studio. Its features and workflow. Also types of the solvers used in Microwave studio and where to apply them.

Keywords: Anthenna design guide, Bachelor thesis, CST Studio, Microwave Studio

Seznam použitých zkratek a symbolů

AKS	– Advanced Krylov Subspace method
AS	– Asymptotic solver
CMA	– Charakteristic mode analysis
CPU	– Central processing unit
CST CS	– CST CABLE STUDIO
CST DS	– CST DESIGN STUDIO
CST MPS	– CST MPHYSICS STUDIO
CST PCB	– CST PCS STUDIO
CST PS	– CST PARTICLE STUDIO
CSTSS	– CST STUDIO SUITE
DFT	– Discrete Fourier transform
EM	– Electromagnetic
EMC	– Electromagnetic compatibility
EMI	– Electromagnetic interference
EMS	– Eigenmode solver
FFT	– Fast Fourier transform
FIT	– Finite Integration Technique
FS	– Frequency domain solver
GPU	– Graphic processing unit
IES	– Integral Equation Solver
JDM	– Jacobi-Davidson method
MKP	– Finite element method - Metoda konečných prvků
MLFMM	– Multilevel Fast Multipole Method
MoM	– Method of moments
MPI	– Message Passing Interface
MS	– Multilayer solver
MWS	– MICROWAVE STUDIO
PBA	– Perfect boundary approximation
PCB	– Printed circuit board
PEC	– Perfect Electrical Conductor
PMC	– Perfect Magnetic Conductor
RCS	– Rich Communication Services
SNN	– Simultaneously Switching Noise

TDR	– Time Domain Reflectrometry
TDS	– Time domain solver
TLM	– Transmission-line matrix method
TST	– Thin sheet technique
TWT	– Travelling Wave Tube

Obsah

Úvod	4
1 CST STUDIO SUITE	5
1.1 CST MICROWAVE STUDIO	6
1.2 CST EM STUDIO	6
1.3 CST PARTICLE STUDIO	6
1.4 CST CABLE STUDIO	7
1.5 CST PCS STUDIO	7
1.6 CST MPHYSICS STUDIO	7
1.7 CST DESIGN STUDIO	8
2 Mřížkování	9
3 Metody a techniky využívané v CST Studiu	12
3.1 Metoda momentů (MoM)	12
3.2 Metoda konečných prvků (MKP)	12
3.3 Reduced order model technique – Reduced-Order Modeling	12
3.4 Advanced Krylov Subspace method (AKS)	12
3.5 Jacobi-Davidson method (JDM)	12
3.6 Multilevel Fast Multipole Method (MLFMM)	12
3.7 Transmission-line matrix method (TLM)	13
4 Typy výpočetních řešičů	14
4.1 Přechodový řešič (Transient Solver)	14
4.2 Frekvenční řešič (Frequency Domain Solver)	15
4.3 Řešič vlastního módu (Eigenmode Solver)	17
4.4 TLM Řešič	18
4.5 Řešič integrálních rovnic (Integral Equation Solver)	20
4.6 Asymptotický řešič (Asymptotic Solver)	21
5 CST MICROWAVE STUDIO	23
5.1 Vlastnosti	24

5.2	Možnosti spouštění a provozu	25
5.3	Standartní pracovní postup v CST MWS	27
6	CST DESIGN STUDIO	28
6.1	Hlavní lišta CST Design Studia	29
6.1.1	Záložka Home	29
6.1.2	Záložka Modeling	29
6.1.3	Záložka Simulation	30
6.1.4	Záložka Post Processing	31
6.1.5	Záložka View	31
6.2	Komponenty	31
6.2.1	Bloky	31
6.2.2	Externí porty	31
6.2.3	Konektory	32
6.2.4	Sondy	32
6.2.5	Propojovací štítky	32
7	Popis práce v CSTSS	33
8	Dosažené výsledky	34
	Závěr	35
	Literatura	36
	Přílohy	38

Seznam obrázků

1.1	Logo CST. [1]	5
1.2	Oblasti využití CST DS. [2]	8
2.1	Zakladní definice: a) mřížkovací buňka b) šestihranné mřížkování. [3] . .	9
2.2	2D mřížkovací buňky. [4]	9
2.3	3D mřížkovací buňky. [4]	10
2.4	Ukázka nestrukturované 2D mřížkovací sítě. [4]	10
2.5	Doporučený postup mřížkování v CST MWS. [3]	11
4.1	Povrchové proudy vyzářené anténou uvnitř vozidla. [12]	14
4.2	CST MWS umožňuje uživateli využít TDS nebo FS na stejném simulačním modelu. [13]	16
4.3	Magnetické pole uvnitř spirálovité konstrukce pomalých vln použité v permaktronu. [14]	17
4.4	TLM uzel a mřížkování. [15]	19
4.5	Porovnání mřížkování „bez“ a „s“ využitím formulace vícenásobné mřížky. [15]	19
4.6	Povrchové proudy na helikoptěře osvětleny rovinnou vlnou při 7GHz. [16]	20
4.7	Simulace radaru lodi.[17]	21
5.1	Urychlení simulačního času v závislosti na poměru jader CPU. [18]	25
5.2	Urychlení simulačního času použitím GPU oproti dual Xeon E5-2643 v3 CPU. [18]	26
5.3	Uživatel zašle úlohu na DC Main Controller, který vybere vhodné DC Solver Servery a úlohu jim zašle. [18]	26
5.4	CSTSS Frontend připojený k výpočetním uzlům. Může využít vysokorychlostní propojovací síť mezi uzly. [18]	27
6.1	Prostředí CST Design Studia.	28
6.2	Lišta - Záložka Home.	29
6.3	Lišta - Záložka Modeling.	29
6.4	Základní stavební tvary. [19]	30
6.5	Lišta - Záložka Simulation.	30
6.6	Lišta - Záložka Post Processing.	31
6.7	Lišta - Záložka View.	31

Úvod

Tato bakalářská práce vznikla za účelem podpory studentů při práci s CST Studií. Je v ní obecně popsán software CST Studio a jeho moduly se zaměřením na Microwave Studio. Možnosti jeho provozu, vlastnosti a pracovní postup v něm. Také se zabývá typy řešičů, které Microwave Studio využívá a v jaké situaci je vhodné daný řešič využít. V druhé části se bakalářská práce zabývá popisem společného návrhového prostředí pro CST Studio Suite – DESIGN Studia a praktickou příručkou pro práci v Microwave a Design studiu včetně návodu vytvoření a simulace antény Yagi-Uda.

1. Kapitola obsahuje popis CSTSS a všech jeho modulů
Seznámení se společností která vyvíjí CST Studio, k čemu je využíván jejich software, jaké moduly obsahuje a k čemu jsou využívány.
2. Kapitola se zabývá pojmem mřížkování
Vysvětlení tohoto pojmu, typy mřížkovacích buněk a doporučený postup mřížkování.
3. Kapitola obsahuje Metody a Techniky využívané v CST Studiu
Řešiče CST Studia využívají pokročilé metody a techniky. V této kapitole se s nimi seznámíme.
4. Kapitola obsahuje popis výpočetních řešičů používaných v CSTSS
Vlastnosti jednotlivých řešičů, jejich využití a jaké metody a techniky využívají pro svou funkci.
5. Kapitola obsahuje popis a vlastnosti MWS včetně možností spuštění a provozu
Úvod modulu Microwave studia, jeho vlastnosti, možnosti spuštění a provozu a využití.
6. Kapitola obsahuje popis CST DS a jeho uživatelského prostředí
Seznámení s prostředím Design studia a jeho komponenty.
7. Kapitola obsahuje popis práce v CSTSS
Rozsáhlá kapitola popisující práci v CST Studiu se zaměřením na Microwave studio. Modelování antény, nastavení mřížkování, monitorů a simulace, postprocessing a simulace. A také návod na vytvoření antény Yagi-Uda včetně její simulace.

Součástí bakalářské práce je příloha s návodem pro práci v CSTSS a komentovaný video tutoriál.

1 CST STUDIO SUITE



Obrázek 1.1: Logo CST. [1]

CST Studio Suite (CSTSS) je vyvíjeno společností Computer Simulation Technology (CST). CST bylo založeno roku 1992 a vyvíjí široký rozsah simulačních nástrojů. Ústředí se nachází v německém Darmstadtu a má pobočky v mnoha státech, včetně České republiky. Firma má okolo 300 zaměstnanců.

CSTSS je simulační software, který je výsledkem mnoha let výzkumu a vývoje pro co nejpřesnější a nejlépe provedené výpočetní řešení v elektromagnetických návrzích. Obsahuje CST nástroje pro návrh a optimalizaci zařízení operující s širokým rozsahem frekvencí. Analýza obsahuje tepelné i mechanické působení včetně simulaci obvodů. Nabízí online i offline nápovědu, tutoriály a pořádají i výcvikové kurzy. Pravidelně vycházejí nové verze.

Každoročně vycházejí nové verze software CST Studio Suite. V průběhu roku jsou vydávány aktualizace a service packy, ve kterých jsou přidávány nové nástroje a funkce a zpracovávány požadavky zákazníků.

Uživatelské prostředí, CST design environment, je společné pro všechny moduly, které CSTSS obsahuje. Skládá se z 3D modelovacího nástroje a nástroje pro schématické nákresy. Návrhové prostředí kombinuje před-procesor pro řešiče a intuitivní uživatelské prostředí. Pro projekty, které využívají vícero modulů, toto společné návrhové prostředí ulehčuje pracovní postup. Nejenže mohou být modely a pole přesouvány z jedné simulace do další, ale uživatel může ovládat všechny moduly pomocí stejného uživatelského prostředí.

Software je využíván v mnoha odvětvích jako například v letectví, automobilovém průmyslu, telekomunikacích i armádě.

1.1 CST MICROWAVE STUDIO

Microwave Studio (MWS) je nástroj pro 3D EM simulaci vysokofrekvenčních komponentů. Dovoluje rychlou a přesnou analýzu antén, filtrů, rovinných a vícevrstevných struktur a EMC efektů.

1.2 CST EM STUDIO

CST EM STUDIO (CST EM) je nástroj pro simulaci statických a nízkofrekvenčních zařízení. Pro řešení elektrostatiky, magnetostatiky, problémy průtoku proudu a nízkých frekvencí a simulace nabitých částic. Může být kombinováno s CST MPHYSICS STUDIO pro simulace nabitých částic a multifyziky.

Řešič elektrostatického pole může být využit pro vysokonapěťové zařízení nebo kapacitory. Řešič magnetostatického pole se používá v případech kdy vírové proudy nejsou důležité nebo když materiály mají nelineární charakteristiku. Rovněž nabízí automatické výpočty impedance. Řešič stacionárního proudu se hodí k výpočtu rozložení proudu ve ztrátových materiálech. Tyto výpočty pak mohou být použity pro výpočty magnetostatiky. Nízkofrekvenční řešič má nejlepší využití pro problémy s nezanedbatelnými ztrátami. Vlnovité proudy, ztrátová hustota a hustota energie může být vypočítána navíc k elektrickým a magnetickým polím. Rovněž řešič obsahuje možnost vzít v potaz šíření vln v zařízení, dovolující výpočet posuvného proudu. Nízkofrekvenční časový řešič dovoluje začlenění výpočtu nelineárních efektů do nízkofrekvenčních simulací.

1.3 CST PARTICLE STUDIO

CST PARTICLE STUDIO (CST PS) je nástroj pro rychlou a přesnou analýzu dynamiky nabitých částic v 3D elektromagnetickém poli. Vhodné pro návrhy magnetronů, nastavování elektronek, modelování zdrojů částic a komponentů urychlovače. Hodí se pro typy úloh jako například návrh magnetronů, ladění elektronek a návrhu zdroje částic a komponentů akcelérátoru. Je propojeno s CST MWS a CST EM.

Particle Tracking řešič může modelovat chování částic přes statické pole nebo prostoro-rově nabitě omezené emise. Výsledek může být proud paprsku, emittance, perveance nebo kolizní informace. Využití je například v elektronových dělech nebo kolektorech. *Particle-in-cell* (PIC) řešič může provést plně konzistentní simulaci částic v elektromagnetických polích. Může využít pokročilých vlastností z CST MWS. Může být využit pro oscilátory zpětných vln, klystrony nebo permaktrony. Wakefield řešič může spočítat, jak pole generované částicemi, které cestují rychlostí blízkou rychlosti světla a působí na struktury kolem nich.

1.4 CST CABLE STUDIO

CST CABLE STUDIO (CST CS) je nástroj pro třírozměrnou analýzu integrity signálu, vedených a vyzařovacích emisí a elektromagnetické odolnosti komplexních kabelových struktur v elektricky složitých systémech. Nabízí importování podkladů z populárních nástrojů MCAD a ECAD pro jednoduchou integraci do industriálního pracovního postupu.

S hlavním zaměřením na využití v letectví a automobilovém průmyslu. CST CS je vybaveno vylepšenými vizualizačními dovednostmi, které dovolují zvýraznit vybrané signály nebo kabely jak v 3D náhledu tak i ve schématickém 2D. Vizualizace konektorů a kabelů je jednoduchá. Informace zobrazující který kabel vede jaký signál nebo jaké kabely jsou připojeny k jakým pinům konektorů, jsou lehce dostupné v navigačním panelu.

CST CS může jednoduše vyměňovat data s 3D řešiči MWS.

1.5 CST PCS STUDIO

CST PCS STUDIO (CST PCB) Nástroj pro analýzu integrity signálu a výkonu a elektromagnetické kompatibility pro plošné spoje. Obsahuje filtry pro import populárních projekčních nástrojů Cadence, Zuken a Altium. Než započne modelování a simulace importované data jsou automaticky kontrolovány a případné geometrické chyby opraveny.

Intuitivní pracovní postup CST PCB a jeho přesné a moderní simulační techniky dovolují zkoumání jakýchkoli PCB (tištěných spojů). Od jednovrstvých spojů až po několika-vrstvé vysokorychlostní řešení. Efekty jako rezonance, odrazy, přeslechy nebo simultánní přeskoky hluku (SNN) mohou být simulovány v jakékoliv fázi vývoje. Nástroj výběru dovoluje zvýraznění sítí a komponentů jak v seznamu sítí, tak i v grafickém náhledu. Vybaven knihovnou dílů dovoluje CST PCB rychlou výměnu komponentů na tištěném spoji za účelem zkoumání, nebo vylepšení oddělení zem/energie.

1.6 CST MPHYSICS STUDIO

CST MPHYSICS STUDIO (CST MPS) je nástroj pro analýzu mechanické a teplotní námahy. Spočítá teplotní roztažnost komponentů a také námahu a tlak, jakými působí vůči svému zapouzdření. Systémy a zařízení zřídka zapadají pouze do jedné oblasti fyziky, takže simulátor multifyziky je často potřebný pro kompletní simulaci charakteristik zařízení.

Vysokofrekvenční pole, proudy a kolize částic jsou zdroje tepla, se kterými se EM inženýři běžně setkávají. MPS je začleněno v CSTSS, aby mohlo spolupracovat s jinými moduly jako je MWS, CST EM a CST PS.

Za pomoci teplotního řešiče (Thermal Solver), obsaženého v CST MPS, změny teplot způsobené těmito interakcemi mohou být modelovány a tepelný tok uvnitř zařízení může

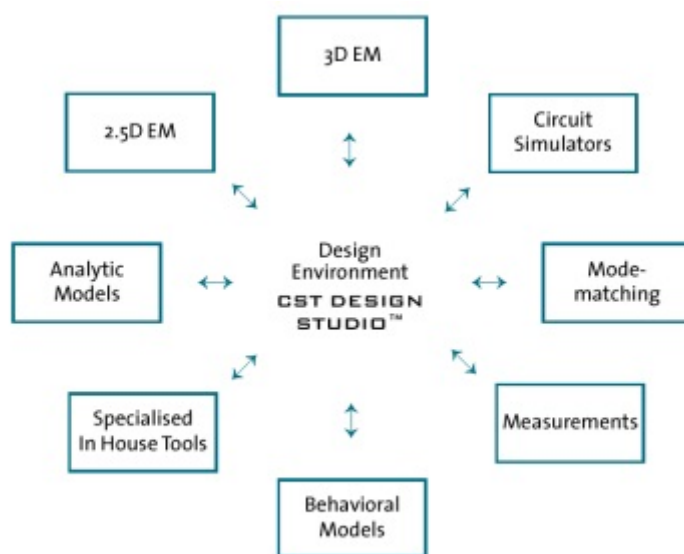
být simulován pro testování teplotních poklesů a zajištění spolehlivosti teplotně citlivých komponentů.

Kromě teplotních distribucí, CST MPS dokáže rovněž simulovat tepelnou roztažnost komponentů a mechanický řešič vypočítá jejich tlak a námahu s jakou působí na své pouzdro. Výsledky těchto simulací mohou být odeslány zpět do EM simulací, nabízející možnost provedení analýzy, jak zařízení reaguje na teplotu.

1.7 CST DESIGN STUDIO

Nástroj pro návrh schémat. Jednoduchost jeho použití značně zrychluje analýzu, syntézu a optimalizaci komplexních struktur a elektromagnetických systémů.

CST DESIGN STUDIO (CST DS) dovoluje syntézu komplexních systémů počínaje simulačními bloky, které představují komponenty obvodu. *Ibis* a *Touchstone* modely nebo analytické modely z vestavěné knihovny. Zvláště cenné jsou parametrické modely z různých modulů CSTSS jako jsou CST MWS, CST PSBS a CST CS. Všechny tyto simulační bloky mohou být syntézovány pomocí CST DS. Koncept simulačních úloh dovoluje rychlou analýzu různých aspektů chování celého systému.



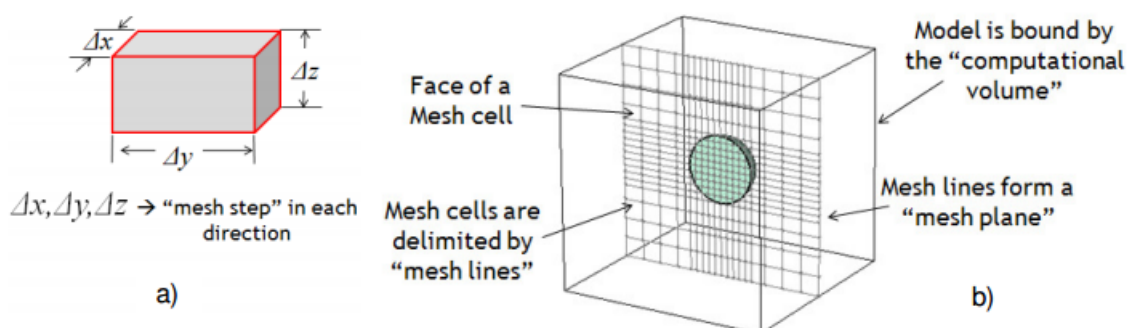
Obrázek 1.2: Oblasti využití CST DS. [2]

Otevřená architektura CST DS dovoluje uživateli kombinování výsledků z nejlepšího možného zdroje (simulační nástroj, analytický model, výsledky měření) v jednom uživatelsky přívětivém prostředí.

2 Mřížkování

Anglicky *mesh* neboli *meshing*. Mřížka je síť liniových prvků a propojovacích uzlů použitých k vymodelování konstrukčního systému a vypočítání simulovaného chování pod zátěží. Výpočetní techniky vytvoří analytický model vyplněním materiálu konečnými prvky mřížkování, kde každý prvek má přiděleny matematické atributy, které simulují materiál a geometrické vlastnosti konstrukčního systému. Následně se na systém může aplikovat mechanická zátěž a různé teplotní podmínky.

V metodách časové oblasti je nejčastěji využíván hexahedrální mřížkování, neboli šestihranné mřížkování. V tomto druhu mřížkování je výpočetní objem diskretizován proměnlivou velikostí obdélníkových hranolů. Jednotlivý hranol je nazýván mřížkovací buňkou.

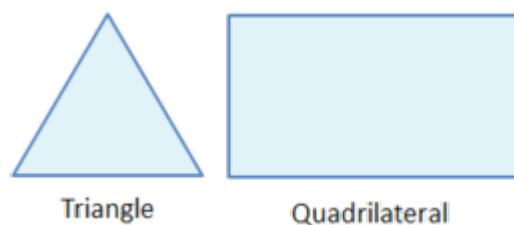


Obrázek 2.1: Základní definice: a) mřížkovací buňka b) šestihranné mřížkování. [3]

V diskretizované formě jednotlivé mřížkovací buňky reprezentují malý objem prostoru, kde elektrické a magnetické pole jsou vypočítány. Pochopitelně čím více je mřížkovacích buněk, tím lepší je přesnost zachycení přechodů polí. Nicméně celkový počet mřížkovacích buněk by se neměl bezdůvodně navyšovat, jelikož má přímý vliv na celkový čas simulace. Tudíž je zapotřebí dobře vyvážit poměr rychlosti simulace a její přesnost.

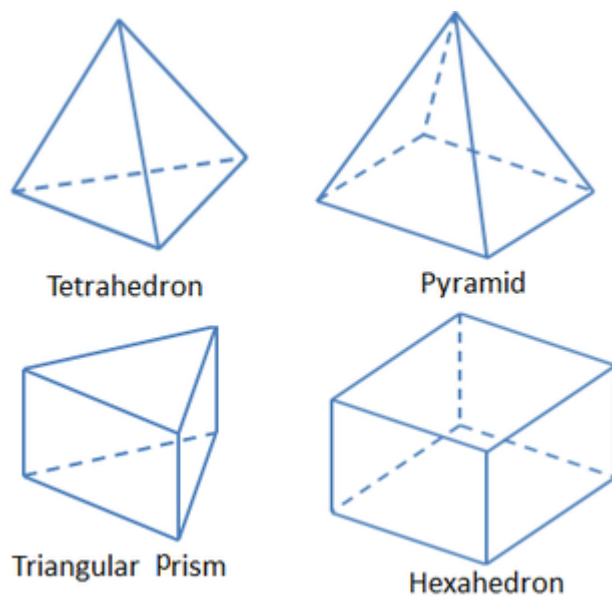
Omezením frekvenčního rozsahu simulace, na námi požadovaný, může značně snížit počet mřížkovacích buněk.

Buňky mřížkování mohou být různé. Dvouprostorové typy jako například obdélník, čtverec a trojúhelník.



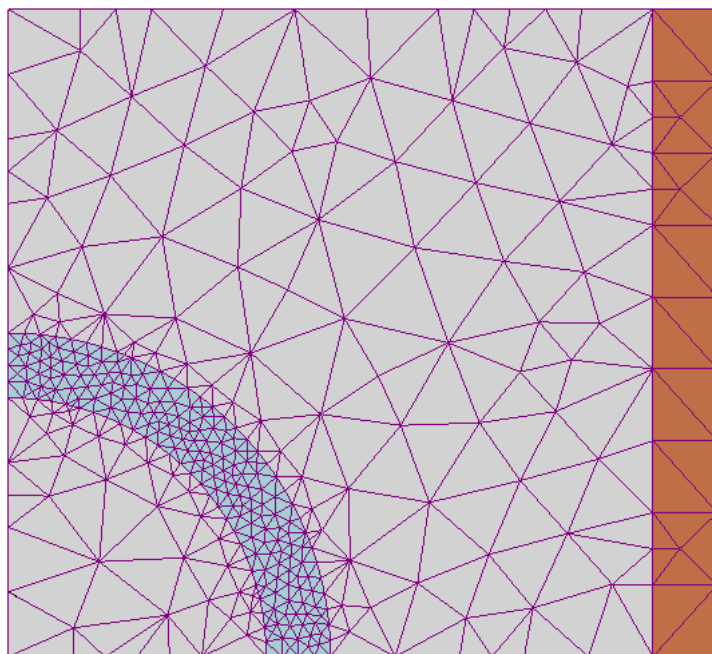
Obrázek 2.2: 2D mřížkovací buňky. [4]

Také tříprostorové typy - čtyřstěn, pyramida, trojboký hranol a hexahedron (šestistěn).

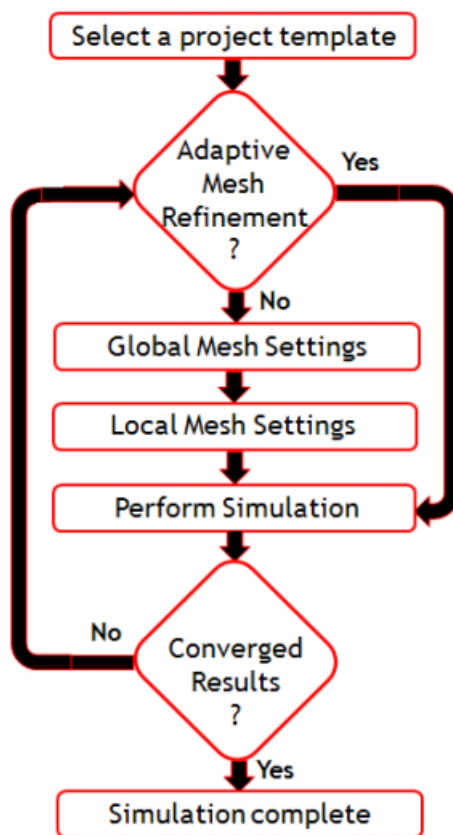


Obrázek 2.3: 3D mřížkovací buňky. [4]

Mřížkovací buňky mohou tvořit komplexní sítě. Základní typy mřížkovacích sítí jsou strukturované, nestrukturované a hybridní.



Obrázek 2.4: Ukázka nestrukturované 2D mřížkovací sítě. [4]



Obrázek 2.5: Doporučený postup mřížkování v CST MWS. [3]

Máme možnost si zvolit mezi adaptivním nastavením mřížkování nebo si mřížkování nastavit manuálně pomocí globálního a následně manuálního nastavení. Následně můžeme spustit simulaci.

3 Metody a techniky využívané v CST Studiu

3.1 Metoda momentů (MoM)

Porovnává výběrové momenty získaných dat s odpovídajícími teoretickými momenty předpokládaného rozdělení s hustotou. Využívá se pro konstrukci bodových odhadů neznámých parametrů známých rozdělení. Obsažená např. v IES. [5]

3.2 Metoda konečných prvků (MKP)

MKP spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického místa konstrukce. Obsažená např. v přechodovém řešiči. [6]

3.3 Reduced order model technique – Reduced-Order Modeling

Technika pro snížení výpočetní komplexity matematických modelů a výpočetních simulací. Snižuje přesnost modelu za značné snížení potřebného času. Využitá např. v TDS. [7]

3.4 Advanced Krylov Subspace method (AKS)

Krylovy podprostory jsou uplatněny v metodách pro hledání vlastních hodnot velkých řídkých matic nebo pro řešení velkých soustav lineárních rovnic, kde je z hlediska výpočetní složitosti jejich výhodou, že dochází k násobení velké matice vektorem, a nikoliv k násobení přímo velkých matic mezi sebou. Metoda je využita např. v IES. [8]

3.5 Jacobi-Davidson method (JDM)

JDM je populární technika k výpočtu několika eigenpairs velkých řídkých matic. Metoda byla vytvořena z důvodu, že standartní eigensolvery často vyžadovali obtížnou faktorizaci matice aby mohli vypočítat vnitřní eigenhodnoty. Využití v IES. [9]

3.6 Multilevel Fast Multipole Method (MLFMM)

MLFMM, využívaná zároveň s Metodou Momentů, je numerická výpočetní metoda pro řešení lineárních parciálně diferenciálních rovnic, které jsou formulovány jako integrální rovnice velkých objektů bez ztráty přesnosti. Metoda je alternativní formulací technologie Metody Momentů, ale pro použití na mnohem větších strukturách. Použití v IES. [10]

3.7 Transmission-line matrix method (TLM)

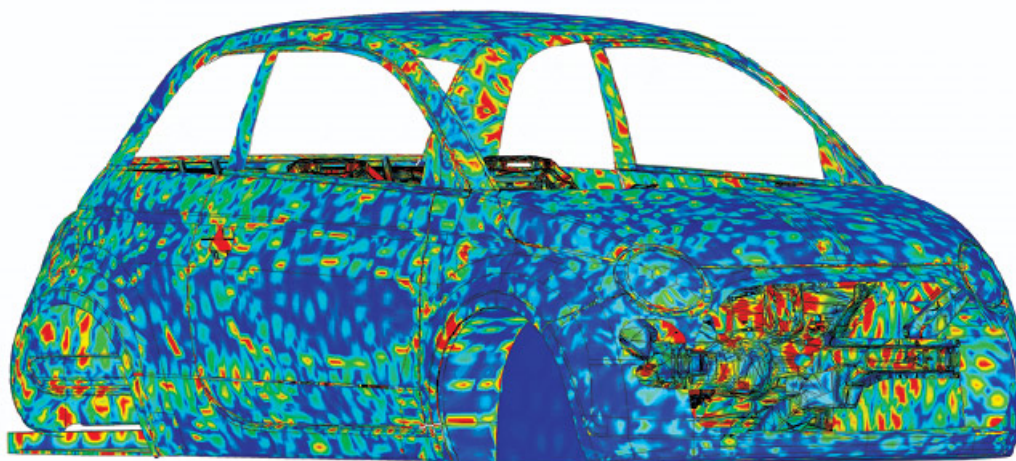
TLM je metoda pro výpočet elektromagnetických polí. Je založena na analogii mezi elektromagnetickými polem a mřížkováním přenosových linek a také umožňuje výpočet komplexní třírozměrné elektromagnetické struktury. Využití v TLM řešiči. [11]

4 Typy výpočetních řešičů

CST MWS nabízí zákazníkům výběr mnoha řešičů (anglicky solver) využívající například Metodu momentů, Metodu konečných prvků, *Multilevel Fast Multipole Method* a další, každá nabízející určité výhody pro své oblasti použití. Integrace řešičů do uživatelského prostředí dovoluje jednoduchý výběr nejvhodnějšího řešiče pro daný problém.

4.1 Přechodový řešič (Transient Solver)

3D EM simulátor s obecným účelem. Simulace v reálném čase je užitečná pro studium pole rozšiřující se komponentem nebo po stopách PCB a může být použita ve velkém množství EM aplikací. Tento řešič využívá například *Time Domain Reflectometry* (TDR) a *Signal Integrity* simulace.



Obrázek 4.1: Povrchové proudy vyzářené anténou uvnitř vozidla. [12]

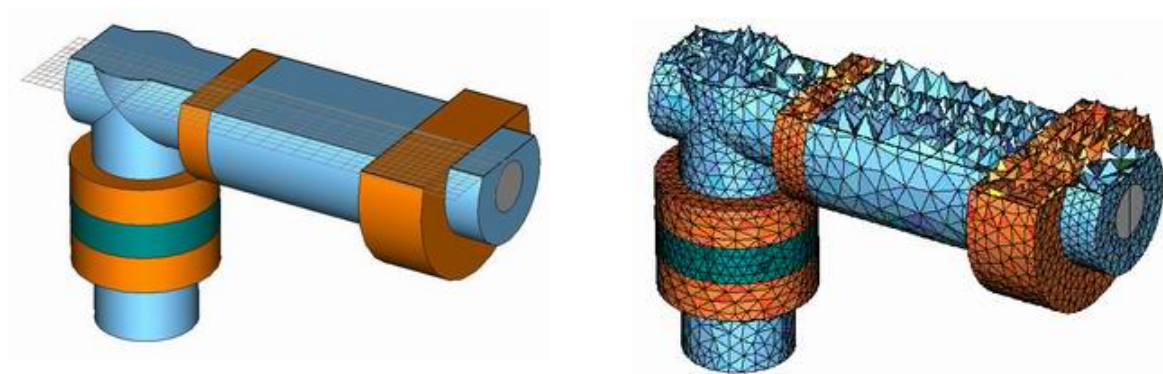
Vhodný i pro výpočty S-Parametru z oblasti širokopásmové frekvence. Tato simulace může být provedena s libovolně detailním rozlišením frekvence bez navýšení složitosti výpočtu, díky čemuž se vyhne ztrátám rezonancí ve spektru.

- Metoda konečných prvků – rychlá a úsporná na paměť
- Výkonné výpočty pro ztrátové a bezztrátové konstrukce
- Přímá časová analýza a širokopásmové výpočty S-parametru z jediného výpočetního cyklu za použití DFT pro časové signály
- Výpočet rozložení polí z pohledu času nebo na vícero frekvencích v jednom simulacním cyklu

- Mění se mřížková jemnost ve 3D za použití S-Parametru nebo výsledku 0D jako kritérií pro ukončení
- Paralelizace MPI Clusteru za pomoci domain decomposition
- Podpora hardwarové akcelerace (NVIDIA GPU nebo Intel Xeon Phi) s možností použití až 8 grafických karet
- Kombinovaná simulace s MPI a hardwarovou akcelerací
- Podpora Linuxového dávkového souboru a systému dávkovaného zpracování úloh (např. OGE, LSF)
- Podpora více než 2 miliard mřížkových buněk (s MPI)
- Izotropní a anizotropní vlastnosti materiálu
- Vlastnosti materiálu v závislosti na frekvenci s libovolným pořadím pro permitivitu a permeabilitu
- Gyotropní materiály a mikrovlnně vázaná plazma
- Nelineární materiálové modely (Kerr, Raman)
- Prostorově odlišné modely materiálu (obecné nebo s radiální závislostí)
- Model impedance povrchu
- Speciální perforace materiálu
- Vodivé materiály se závislostí na čase
- Materiály se závislostí na teplotě s propojením do CST MPHYSICS STUDIO

4.2 Frekvenční řešič (Frequency Domain Solver)

Nástroj s obecným zaměřením. Dokáže vypočítat S-parametry, ale i blízké a vzdálené pole. Vhodný pro práci s elektricky malými strukturami nebo zařízeními, které mají vysokou hodnotu činitele kvantity (Q). Jeho unikátní vlastnost je možnost přepnutí z Kartézského na čtyřboké mřížkování. Mimo zobrazení segmentace na zakřiveném povrchu, povrchové mřížkování zvyšuje přesnost a rychlost.



Obrázek 4.2: CST MWS umožňuje uživateli využít TDS nebo FS na stejném simulačním modelu. [13]

Adaptivní *frequency sweep* (pozn. Frequency sweep je skenování pásma pro detekci signálů, které se v něm přenáší) dovoluje rychlé širokopásmové výpočty. Pro oba mřížkovací typy jsou implementovány adaptivní mřížkovací schémata. Rovněž nabízí přímý a nepřímý řešič pro řešení rovnic. Přímý řešič je doporučen, pokud počet čtyřstěn není příliš vysoký.

Klíčová část frekvenčního řešiče jsou periodické struktury. CST MWS obsahuje implementaci periodické hranice, která automaticky vytváří hranice pro svěvolně tvarované buňky. Porty jsou vybaveny *Flanquest-mode* řešiče pro vysoce přesné a rychlé simulace a také snadnou analýzu polarizace a typu módu.

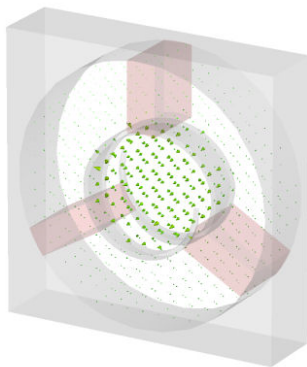
- Výkonné výpočty pro bezztrátové a ztrátové konstrukce
- Podpora šestihranného mřížkování i lineárního a zakřiveného čtyřbokého mřížkování
- Adaptivní jemné mřížkování ve 3D za použití S-parametru ve vícero frekvenčních bodech, širokopásmové S-parametry i 0D a 1D šablony výsledků jako ukončující kritérium
- Speciální mřížkovací jemnost pro jednotlivé hrany
- Přesná geometrická adaptace
- Možnost údržby šestihranného mřížkování během optimalizace a vyprázdnění parametrů s malými geometrickými změnami
- Rychlé širokopásmový adaptivní sweep S-parametrů
- Logaritmický, uživatelem nastavený sweep S-parametrů se stejnými vzdálenostmi A vyhodnocení 1D výsledků
- Pokračování běhu řešiče s přidávanými vzorky frekvence

- Nízká stabilizace frekvence
- Přímý a iterativní řešič matice s konvergentními akceleračními technikami
- Vyšší řád reprezentace oblastí, buď s konstantním nebo proměnlivým pořadím
- Izotropní a anizotropní vlastnosti materiálu
- Libovolné vlastnosti materiálu v závislosti na frekvenci
- Model impedance povrchu pro dobré vodiče, ohmické tabulky a frekvenčně závislé data impedance a potažených materiálů
- Nehomogenní neobjektivní ferity se statickým biasing field

4.3 Řešič vlastního módu (Eigenmode Solver)

Určen pro simulaci uzavřených rezonančních konstrukcí. Výstup simulace je rozložení módů a eigenfrekvence konstrukce. Rovněž využívá proprietární *perfect boundary approximation* (PBA), která doručí rychlou konvergenci za krátký čas. Příklady použití mohou být například stanovení pólů vysoce rezonanční filtrující konstriktce, výpočet Q-hodnoty a návrh konstrukcí využívající pomalé vlny (*Travelling Wave Tube* (TWT) nebo urychlovací dutiny)

Příklady použití mohou být například stanovení pólů vysoce rezonanční filtrující konstriktce, výpočet Q-hodnoty a návrh konstrukcí využívající pomalé vlny (TWT nebo urychlovací dutiny)



Obrázek 4.3: Magnetické pole uvnitř spirálovité konstrukce pomalých vln použité v permaktronu. [14]

K dispozici má dva řešiče: *Advanced Krylov Subspace method* (AKS) a *Jacobi-Davidson method* (JDM). AKS řešič vypočítá efektivitu a počet módů s nejnižšími rezonančními frekvencemi v bezeztrátové konstrukci. JDM může být využit pro výpočty non extremal

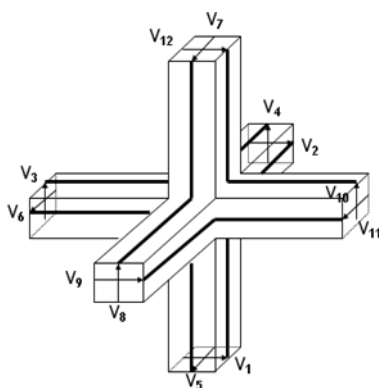
módů na libovolných pozicích v spektru. Navíc JDM může být použit na vysoce ztrátové materiály.

Obsahuje periodické okrajové podmínky a podporuje automatické vytváření disperzních diagramů (diagram závislosti šíření fázové rychlosti šíření vlny na její frekvenci).

- Výpočty rozložení modálního pole v uzavřené bezeztrátové a ztrátové
- Podpora šestihranného mřížkování a také lineární a zakřivené čtyřboké mřížkování
- Izotropní a anizotropní materiály
- Vícevláknová paralelizace
- Proměnlivá jemnost mřížkování ve 3D, s přesnou geometrickou adaptací
- Periodické okrajové podmínky obsahují fázový posun
- Výpočty ztrát interního a externího Q-faktoru pro každý mód
- L, C elementy na jakékoliv pozici v jakékoliv konstrukci
- Nastavení cílové frekvence
- Výpočet všech vlastních módu ve zvoleném frekvenčním intervalu
- Analýza citlivosti s ohledem vůči materiálu a geometrickým deformacím definovanými čelními omezeními
- Parameter sweep tool pro automatickou studii parametru
- Automatická optimalizace nezávislých cílů za použití vestavěného optimalizátoru
- Sítová distribuce výpočtů pro optimalizaci a sweep parametrů

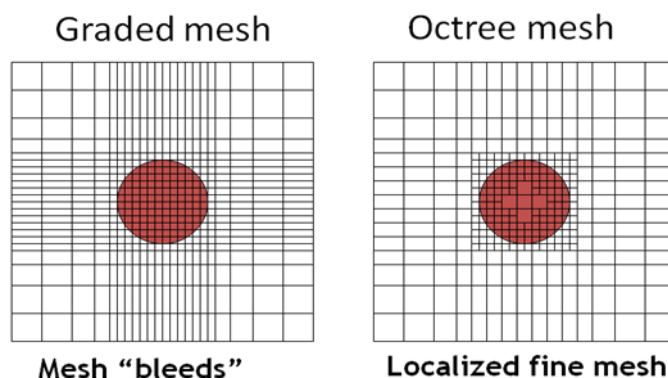
4.4 TLM Řešič

Založen na 3D *time-domain Transmission-Line Matrix* (TLM) metodě. Tato metoda je používána přes 40 let a je výhodná pro využití v oblasti EMC/EMI, například vyzařované a vodivé emise nebo ideální zdroje napětí a proudu pro problém EMC. Klasifikována jako *full-wave, volume-mřížkový* technika. Maxwellovi rovnice jsou důkladně řešeny v prostoru a čase. Využívá síť přenosových linek, neboli „uzlů“, k vymodelování elektromagnetických polí přímo v jednotlivých šestihranných buňkách. Prostor je modelován pomocí 3D pole, například uzly. Řešič využívá čas zastavující algoritmus. V každém kroku jsou incidenty pulsu v uzlu změněny dle rozložení matice uzlů a propojení se sousedními uzly.



Obrázek 4.4: TLM uzel a mřížkování. [15]

TLM řešič využívá formulace vícenásobné mřížky. Šestihranné mřížkování je nejprve upraveno pro zachycení detailů geometrie. Malé mřížkovací buňky jsou automaticky kombinovány. Úroveň kombinace se zvyšuje se vzdáleností od geometrických hranit. Tento proces odstraní překrývání v mřížkování, minimalizuje počet buněk a sníží nároky na hardware na minimum. Výsledek je víceúrovňové octree mřížkování. Ve většině případů je počet mřížkovacích buněk snížený o 90



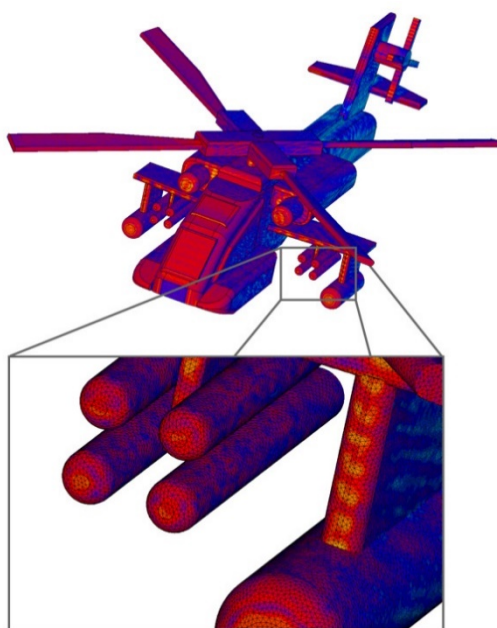
Obrázek 4.5: Porovnání mřížkování „bez“ a „s“ využitím formulace vícenásobné mřížky. [15]

- Využití pro EMC/EMI, například vyzářené emise a imunita. EMC a osvětlení, elektrostatický výboj, vysokorychlostní interference a analýza stínění
- Podporuje akceleraci pomocí GPU
- Vlastnosti izotropních a anizotropních materiálů
- Funkce pro vyplnění vlastností materiálů
- Vlastnosti materiálu v závislosti na frekvenci
- Materiály se speciální perforací, například větrací panely

- Uživatelem definované rušící signály a databáze signálů
- Současné rušení portů s rozdílnými rušivými signály pro jednotlivé porty a širokopásmový posun fáze
- Výpočty různých elektromagnetických kvantit jako například elektrické pole, magnetické pole, povrchový proud, tok energie, hustoty proudu, hustota ztráty energie, hustota elektrické energie, hustota magnetické energie, napětí a proud v oblasti času a frekvence

4.5 Řešič integrálních rovnic (Integral Equation Solver)

IES je věnován elektricky složitým konstrukcím, které jsou řízeny kovem. Dielektrika, ztrátové a bezztrátové mohou být rovněž zváženy. Využívá Metodu momentů (MoM) diskretizaci s povrchovou integrální formulací elektrického nebo magnetického pole. Pro snížení náročnosti výpočtů je využit *Multilevel Fast Multipole Method* (MLFMM).



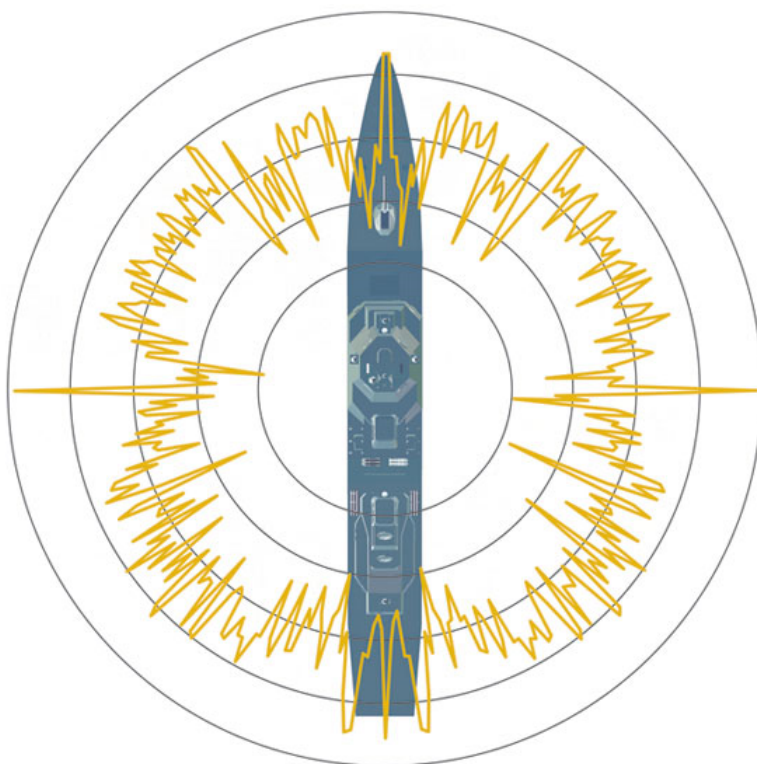
Obrázek 4.6: Povrchové proudy na helikoptěře osvětleny rovinnou vlnou při 7GHz. [16]

- Výpočty antén (zisk, směr vyzařování, potlačení bočních laloků, atd.)
- Výpočty RCS
- *Fast monostatic RCS sweep*
- *Characteristic mode analysis*

- Rušení na vstupu vlnovodu
- Rušení rovinné vlny
- Rušení blízkého pole
- Rušení vzdáleného pole
- Příjem rušení vzdáleného pole
- Rozložení proudu
- R, L, C elementy

4.6 Asymptotický řešič (Asymptotic Solver)

Založen na *Shooting Bouncing Ray method*, což je rozšíření fyzikální optiky a je schopen sledování simulací s elektrickou velikostí o několika tisících vlnové délky jako je například radar cross section analýza.



Obrázek 4.7: Simulace radaru lodi.[17]

Typy výpočetních řešičů

- Specializovaný nástroj pro monostatické a bistatické *RCS sweeps* a výpočty dohledu antén
- Výpočty elektrických a magnetických polí
- Různé excitace rovinné vlny s více typy polarizace
- Rušení zdroje v blízkém a vzdáleném poli
- Robustní diskretizace mřížkování povrchu i zakřivené mřížkování
- Vlastnosti PEC materiálu i vakua
- Výpočty profilových rozsahů a sinogramu
- Výpočty rozptylujících hotspotů
- Výpočty RCS map
- Export čistých dat řešiče do tabulek

5 CST MICROWAVE STUDIO

MWS je softwarový nástroj pro elektromagnetickou analýzu a návrh ve vysokofrekvenčním rozsahu (až 30 GHz). Zjednodušuje proces vytváření struktury pomocí jeho uživatelského rozhraní, které je založeno na modelovacím jádře ACIS. Po vytvoření modelu se použije plně automatizovaný proces mřížkování a následně se spustí simulace. Pokročilý způsob vizualizace a zpracování umožňuje analyzování a vylepšení návrhu. V uživatelském rozhraní je výběr simulací a typu mřížkování pro různé typy řešených problémů.

Obsahuje následující simulační techniky:

Časový řešič (TDS), frekvenční řešič (FS), řešič integrálních rovnic (IES), vícevrstvý řešič (MS), asymptotický řešič (AS) a řešič vlastního módu (EMS).

Každá z těchto simulačních technik podporuje mřížkovací typy, které se k ní hodí nejlépe. Šestihranné mřížkování je k dispozici v kombinaci buď s *perfect boundary approximation* (PBA) a pro některé řešiče s *thin sheet technique* (TST). Nebo mřížkovací algoritmus, který je založený na datové struktuře *octree*, která efektivně snižuje počet buněk. Používání těchto pokročilých technik obvykle zvyšuje přesnost simulace v poměru s technikami, které používají obyčejné šestihranné mřížkování. Navíc k šestihrannému mřížkování, FS a EMS navíc podporují lineární a zakřivené čtyřboké mřížkování. Mimoto, lineární a zakřivený povrch a vícevrstvé mřížkování je k dispozici pro EMS a MS.

Nejvíce simulační flexibility nabízí TDS, který může simulovat chování celé širokopásmové frekvence simulovaného zařízení z jediného výpočetního cyklu. Tento řešič je velice účinný pro mnoho vysokofrekvenčních zařízení jako jsou například konektory, přenosové linky, komponenty vlnovodu a antény. Dva časové řešiče jsou k dispozici, oba používají šestihranné mřížkování založené buď na *Finite Integration Technique* (FIT) nebo *Transmission-Line Matrix* (TLM). TLM se hodí na EMC/EMI/E3 aplikace.

TDS nejsou tak účinné pro struktury dat, které jsou elektricky menší, než je nejkratší vlnová délka odpovídající maximálnímu použitému/nastavenému kmitočtu. V těchto případech je lepší použít FS. Tento řešič také může být použit v případě úzkopásmového zadání, například filtry. Nebo když je použití nestrukturovaného šestihranného mřížkování výhodnější pro vyřešení malého geometrického detailu. Rovněž využívá *fast reduced order model* techniky pro efektivní generování širokopásmových výsledků. Podporuje jak šestihranné, tak čtyřhranné mřížkování.

Pro elektricky složité struktury se *volumetric discretization* metody obecně potýkají s problémy disperze, a proto potřebují jemné mřížkování. Pro tyto případy MWS obsahuje IES. Tento řešič využívá zakřivené trojúhelníkové a čtyřúhelníkové mřížkování, které je pro složité elektrické struktury velice účinné. *Multilevel Fast Multiple Method* (MLFMM) technologie zajišťuje dobrý poměr času řešení a použité paměti pro zvyšující se frekvenci. Pro nižší frekvence, kde MLFMM není tak účinný, je k dispozici přímá iterativní metoda momentů.

Návrh různých typů antén může být velice usnadněn pomocí *characteristic mode analysis* (CMA), která poskytuje přímý náhled na chování vodivého povrchu. Nástroj CMA

je vestavěn do IES a MS a automatizuje proces výpočtu a analýzy těchto režimů.

Navzdory výborné škálovatelnosti, i MLFMM řešič může být neúčinný pro elektricky extrémně komplikované struktury. Například řešení vysokofrekvenčních problémů je nejlépe řešeno využitím asymptotického řešiče. Ten je založen na takzvané ray-tracking technice.

Pro struktury, které jsou převážně planární, například mikropáskové filtry nebo tištěné spoje, může být tato vlastnost využita pro zvýšení účinnosti. Vícevrstvý řešič, založený na Metodě Momentů, nepotřebuje diskretizaci příčně nekonečného dielektrika a kovové roviny. Díky tomu je efektivnější než běžný 3D řešič a navíc je schopný pracovat s CMA.

Efektivní způsob návrhu filtru vyžaduje přímou kalkulaci provozního režimu ve filtru než simulaci S-parametru. Pro toto využití MWS obsahuje řešič vlastního módu. Má k dispozici šestihranné a čtyřhranné mřížkování, které počítají konečné číslo režimů v uzavřených elektromagnetických zařízeních.

Každý simulační výsledek řešiče může být zobrazen s velkým počtem různých nastavení. Dobře udělané interaktivní uživatelské prostředí vám rychle pomůže dosáhnout požadovaného náhledu do vašeho zařízení.

Další z vlastností je plná parametrizace strukturovaného modelu, která dovolí použití proměnných ke všem geometrickým i materiálovým vlastnostem vašeho komponentu v kombinaci s vestavěným optimalizátorem a nástrojem pro vymazání parametrů. CST Microwave studio je schopno jak analýzy, tak návrhu elektromagnetických zařízení.

5.1 Vlastnosti

Obecné:

- Grafické prostředí založené na OS Windows, rovněž může být použit na serveru bez grafického prostředí
- Konstrukce může být zobrazena jako 3D model nebo schéma.
- Výběr nezávislých řešení řešiče, které nabízejí přesné výsledky a vysoký výkon pro všechny vysokofrekvenční využití
- Pro jednotlivé řešiče vysoce pokročilé výpočetní techniky, které nabízejí funkce jako PBA, TST,..

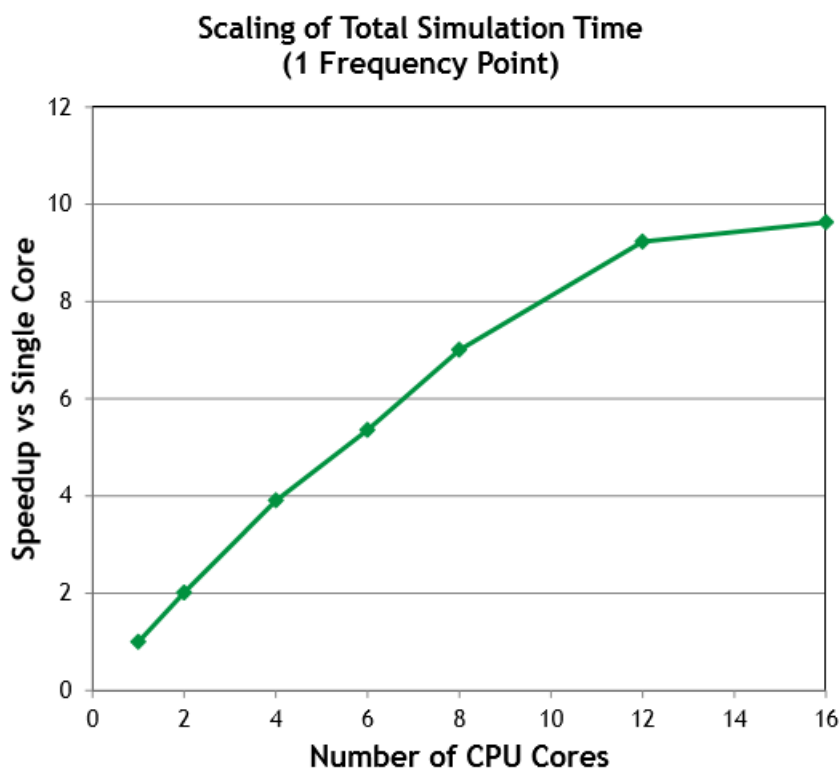
Tvorba konstrukce:

- Pokročilé parametrické uživatelské rozhraní založené na ACIS (geometrické modelovací jádro, umožňuje funkcionalitu 3D modelování) s výbornou vizualizací konstrukce

- Hybridní návrhový nástroj umožňující rychlé konstrukční změny
- Import 3D CAD dat z ACIS SAT (e.g. AutoCAD), ACIS, SAB, Autodesk a mnoho dalšího
- Parametrizace importovaných CAD souborů
- Databáze materiálu
- Konstrukční šablony pro zjednodušené řešení problému

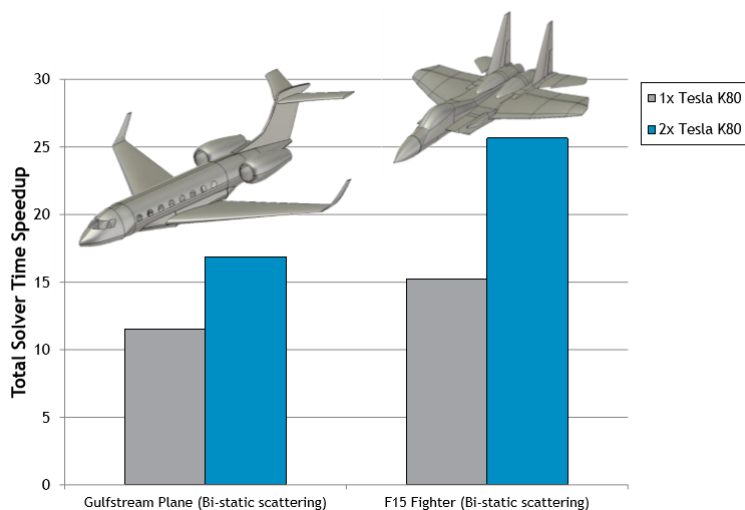
5.2 Možnosti spouštění a provozu

Podpora podprocesů (Multithreading) – Algoritmus je připraven pro využití více jader procesoru. Více jádrová paralelizace až pro 2 CPU je obsažená v každé licenci řešiče.



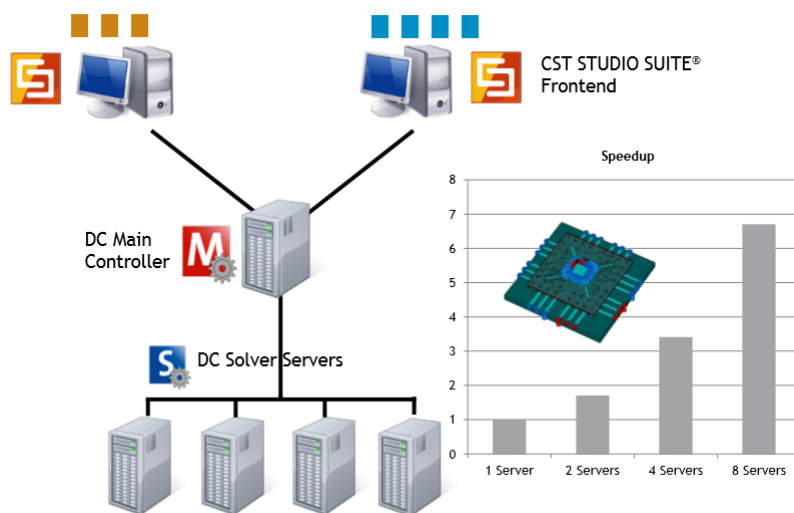
Obrázek 5.1: Urychlení simulačního času v závislosti na poměru jader CPU. [18]

Hardwarová Akcelerace (Hardware Acceleration) – Možnost zrychlení výpočtu využitím GPU. Může být využit pro přechodový řešič, řešič integrálních rovnic a Particle-in-cell (PIC) řešič.



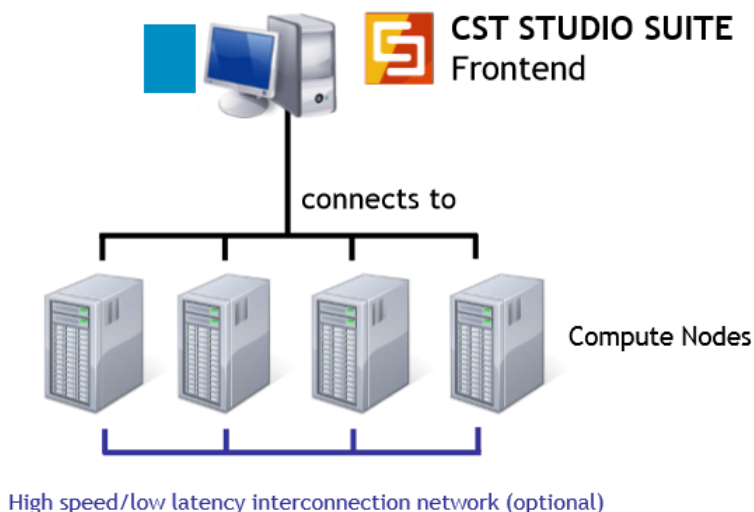
Obrázek 5.2: Urychlení simulačního času použitím GPU oproti dual Xeon E5-2643 v3 CPU. [18]

Rozložení Výpočtu (Distributed Computing) – Některé části simulačních úloh nejsou na sobě závislé, díky tomuto můžeme výpočetní úlohy rozložit na různé stanice v síti LAN. Hardwarové prostředky mohou být sdíleny.



Obrázek 5.3: Uživatel zašle úlohu na DC Main Controller, který vybere vhodné DC Solver Servery a úlohu jim zašle. [18]

Výpočetní MPI (MPI Computing) – využití pro efektivní řešení komplexních modelů. Dovoluje rozložení zátěže mezi výpočetní uzly. Co nejlepší výkon je zajištěn automatickým vyvažováním zátěže a může zároveň fungovat na systémech Windows a Linux.



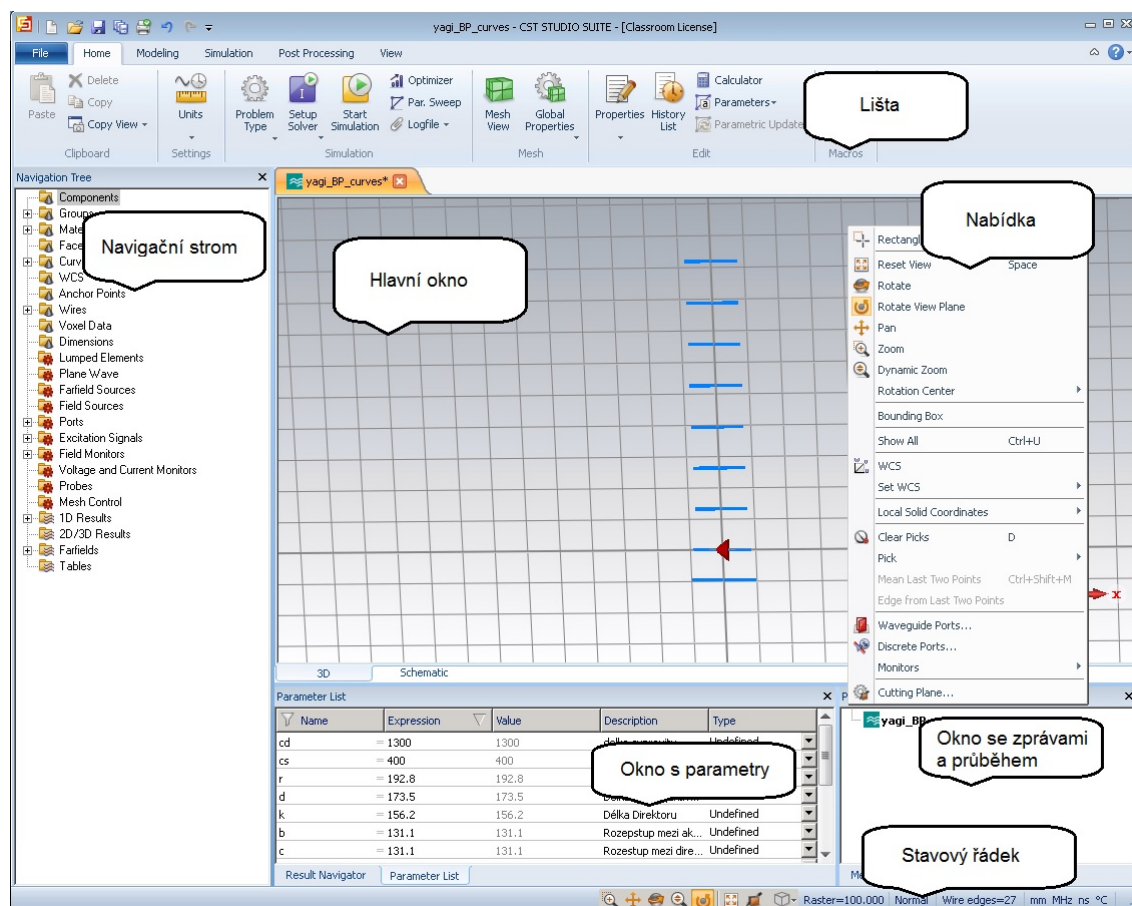
Obrázek 5.4: CSTSS Frontend připojený k výpočetním uzlům. Může využít vysokorychlostní propojovací síť mezi uzly. [18]

5.3 Standartní pracovní postup v CST MWS

1. Výběr šablony projektu
2. Výběr řešiče
3. Vytvoření vlastního modelu. Nastavení parametrů, geometrie, výběr materiálu
4. Definování portů
5. Nastavení rozsahu frekvence
6. Kontrola hranic a specifikace podmínky symetrie. Nastavení symetrie S-parametru sníží čas simulace
7. Nastavení sond a monitorů
8. Kontrola mřížkování. Možnost změny nastavení mřížkování, nedoporučuje se
9. Spuštění simulace
10. Analýza výstupu
11. (Volitelná) optimalizace. Po nastavení cíle můžeme spustit automatickou optimalizaci

6 CST DESIGN STUDIO

CST DS bylo navrženo pro jednoduché použití. Nicméně je zapotřebí znát několik klíčových konceptů.



Obrázek 6.1: Prostředí CST Design Studia.

Pracovní prostředí se skládá z několika oken obsahujících různé náhledy. Jednotlivá okna mohou zobrazovat projekt nebo dostupné výsledky. Také máme na výběr mezi 3D a schématickým zobrazením. Obsah zobrazení záleží na položce zvolené v navigačním stromu.

Všechny výsledky a detaily struktur mohou být vybrány přes navigační strom, který je organizován do složek a podsložek dle specifického obsahu. Při vybrání položky se zobrazí její obsah odpovídajícím způsobem.

Okno s parametry zobrazuje všechny parametry, které jsou v danou chvíli nadefinovány. Parametry mohou být definovány globálně nebo lokálně pro daný blok.

Kdykoliv má pro vás program informace, zobrazí je v oknu se zprávami a průběhem. Může obsahovat obecné informace, varování a chyby. Okno rovněž ukazuje průběh spuštěného procesu a je reprezentován jedním nebo více ukazateli průběhu.

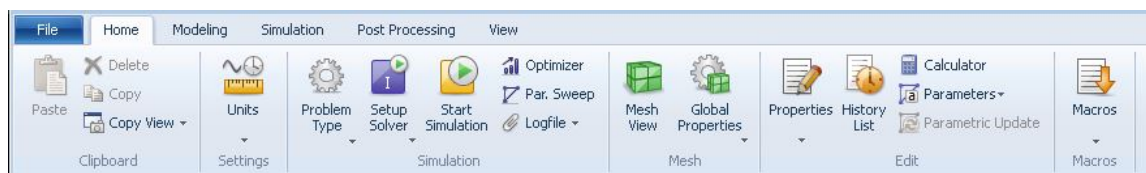
Všechny okna, s výjimkou okna hlavního, jsou konfigurovatelná včetně změny jejich pozice a vyjmutí.

Zbytek elementů je podobný ostatním Windows programům. Lišta nabízí přístup k funkcím programu. Nabídka obsahuje rychlý přístup k potřebným funkcím lišicích se podle okna, ve kterém jste nabídku vyvolali.

6.1 Hlavní lišta CST Design Studia

Lišta CST Design Studia obsahuje 5 základních záložek: Home, Modeling, Simulation, Post Processing a View.

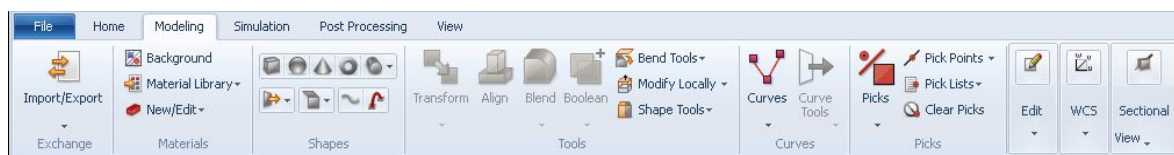
6.1.1 Záložka Home



Obrázek 6.2: Lišta - Záložka Home.

Záložka Home nabízí jednoduchý přístup k základním funkcím a nastavením CST studia. Můžeme zde měnit v jakých jednotkách je náš model, oblast řešeného problému (vysokofrekvenční, nízkofrekvenční, ..), výběr a nastavení řešiče (TDS, IES, FS, ..), optimalizace a další. Rovněž zde můžeme spustit náhled mřížkování, podívat se do logu změn v projektu (Log Historie) a spustit makra.

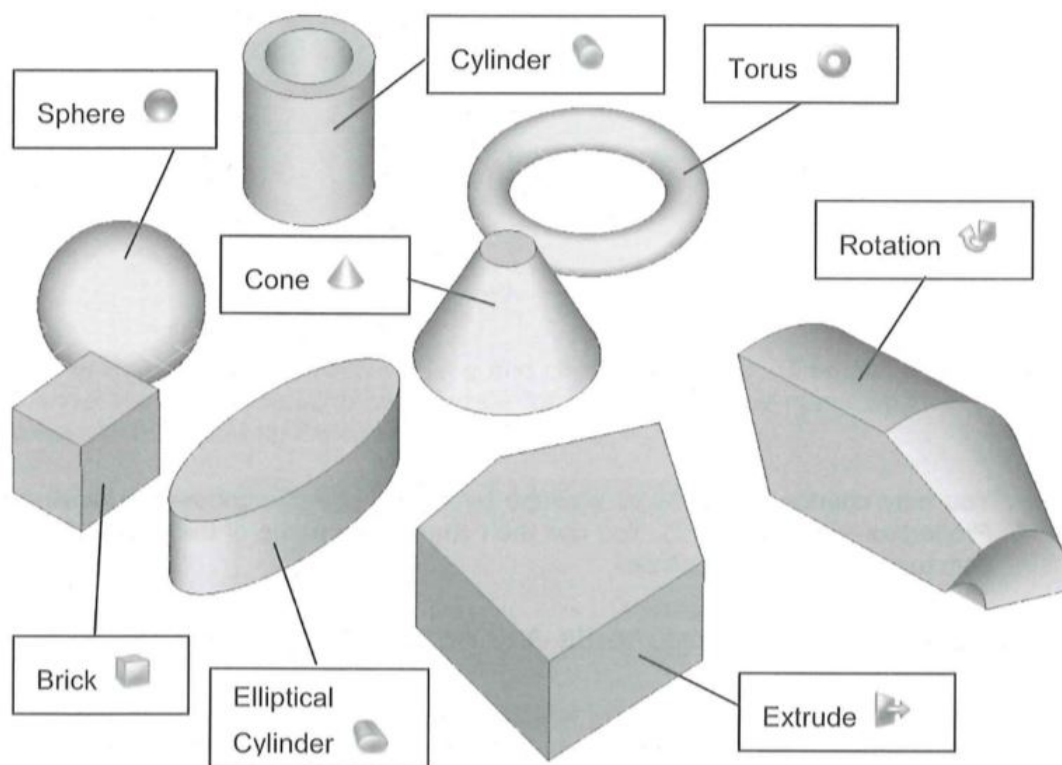
6.1.2 Záložka Modeling



Obrázek 6.3: Lišta - Záložka Modeling.

V záložce Modeling najdeme vše potřebné pro vytvoření modelu. Obsahuje křivky, základní stavební tvary včetně boolean funkcí pro vytváření komplexnějších tvarů, nástroje

pro výběr, lokální koordinační systém a knihovnu materiálů. Také zde můžeme importovat modely z jiných programů a exportovat model z CST DS.



Obrázek 6.4: Základní stavební tvary. [19]

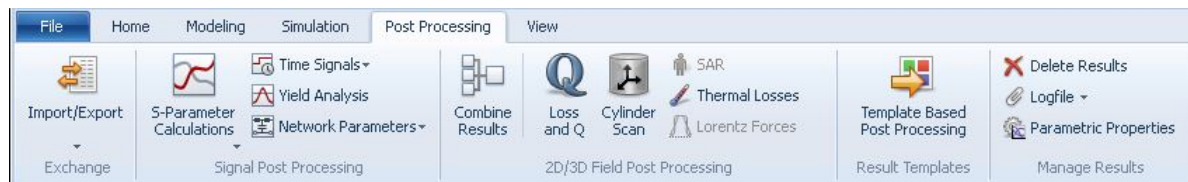
6.1.3 Záložka Simulation



Obrázek 6.5: Lišta - Záložka Simulation.

V záložce Simulation můžeme nastavit frekvenci, hranice, monitory a sondy polí a také přidat našemu modelu různé typy portů. Rovněž obsahuje některé funkce dostupné ze záložky Home (Nastavení řešiče, náhled mřížkování, ..).

6.1.4 Záložka Post Processing

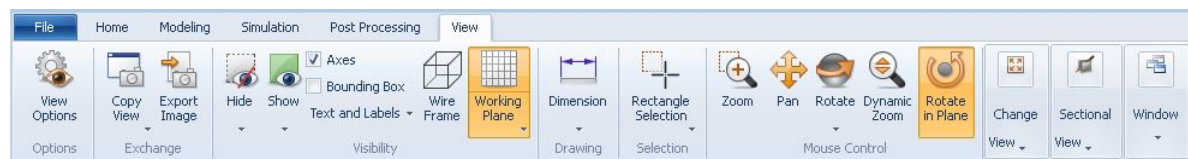


Obrázek 6.6: Lišta - Záložka Post Processing.

Záložka Post Processing nabízí funkce pro výpočet S-Parametru, analýzu časových signálů a výnosu, teplotní ztrátu, výpočet faktoru Q a další. Také obsahuje možnost importu a exportu.

6.1.5 Záložka View

Záložka View nám nabízí změnit nastavení náhledu našeho modelu (Změna barev, průhlednost, šířky apod.). Také nabízí nástroje pro otáčení a přibližování modelu, změnu dimenze a zobrazování a skrytí určitých částí.



Obrázek 6.7: Lišta - Záložka View.

6.2 Komponenty

6.2.1 Bloky

Většina dostupných bloků jsou analytické nebo semi-analytické bloky, jejichž fyzické chování je popsáno parametrizací modelu nebo matematickými formulami.

Různé typy komponentů, pojmenované simulační bloky, mohou být kombinovány pro vytvoření systému. Simulační bloky mohou obsahovat analytické, simulační nebo měřitelné hodnoty a mohou být propojeny a tvořit komplexní obvod.

6.2.2 Externí porty

Externí porty představují zdroje nebo propadliště našeho systému. V závislosti na úloze nebo typu zdroje se mohou lišit. Například zdroj může doručit pulsní signál pro simulaci v časové oblasti nebo velice specifickou komplexní amplitudu pro AC simulační úlohu.

6.2.3 Konektory

Konektor je grafická reprezentace pro elektrické propojení dvou elementů.

6.2.4 Sondy

Sondy mohou být přiřazeny k jakémukoliv konektoru. Zaznamenávají proudy, napětí apod.

6.2.5 Propojovací štítky

Propojovací štítky jsou grafické alternativy pro konektory. Rovněž definují elektrické propojení a mohou být použity, aby bylo schéma lépe čitelné. Všechny bloky propojené štítky se stejným názvem jsou propojeny.

7 Popis práce v CSTSS

Práce v software CSTSS, Design a Microwave Studio je popsána v příloze bakalářské práce. Obsahuje následující kapitoly:

1. Vytváření nového projektu
2. Vzhled pracovní plochy
3. Vytvoření vlastního modelu
4. Historie
5. Definování hraničních a symetrických podmínek
6. Mřížkování
7. Výběr a nastavení řešiče
8. Monitory
9. Post Processing
10. Optimalizace
11. Vytvoření a simulace vlastního modelu antény

Na adrese <https://youtu.be/aDmfS0AMrjU> je dostupná komentovaná videoukázka vytvoření a simulace vlastního modelu antény, název videoukázky je **CST Microwave: Yagi-Uda - Vytvoření modelu a nastavení simulace**.

8 Dosažené výsledky

V bakalářské práci je teoreticky zpracován software CST Studio se zaměřením na Microwave studio. Charakteristika, vlastnosti a využití jeho modulů a jimi využívaných řešičů. Příloha bakalářské práce "Příručka pro práci v CSTSS, Design a Microwave" komentuje všechny potřebné funkce a nastavení pro práci s Design a Microwave studiem. Počínaje návrhem a vytvořením modelu přes nastavení mřížkování a simulace až po zpracování výsledků výpočtů a simulací a jejich optimalizaci včetně názorné ukázky vytvoření a simulace antény Yagi-Uda. Výsledek práce je výuková pomůcka pro předmět Radiokomunikační technika I.

Závěr

Bakalářská práce v teoretické části pojednává o řešičích a k nim vhodných mřížkovacích technikách, které CST Studio obsahuje. Se zaměřením na Microwave Studio je rozebráno vhodné využití mřížkovacích technik a řešičů v závislosti na řešených problémech a konstrukcích.

Příručka pro práci v CSTSS, Design a Microwave Studiu obsahuje popis práce v CST Design studiu, vytvoření nového projektu, návrh modelu antény, výběr a nastavení řešičů a mřížkování, zpracování výstupu a optimalizace včetně popisů a vysvětlení klíčových nastavení a funkcí Design a Microwave Studia. Také obsahuje návod na vytvoření vzorové antény Yagi-Uda a vhodné nastavení pro rychlou a účinnou simulaci se zobrazením a optimalizací výsledku. Příručka usnadní orientaci a práci v software CST Studio Suite pro studenty předmětu Radiokomunikační technika.

René Gruszkowski

Literatura

- [1] CST STUDIO SUITE 2014 Release, Mirco Cadamuro, 2014. In: veryfields.net [cit. 2017-04-17]. <http://www.veryfields.net/cst-studio-suite-2014>
- [2] CST DESIGN STUDIO in CST STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-17]. <https://www.cst.com/products/cstds>
- [3] Understanding Time Domain Meshing in CST MICROWAVE STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-13]. <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=578c450ceeae3937441b63a1&assetKey=AS%3A385033333428224%401468810508239>
- [4] Types of mesh [online]. en.wikipedia.org 2013 [cit. 2017-04-17]. https://en.wikipedia.org/wiki/Types_of_mesh
- [5] The Method of Moments. In: www.math.uah.edu [online]. [cit. 2016-12-13] <http://www.math.uah.edu/stat/point/Moments.html>
- [6] Cyril Höschl: Metoda konečných prvků [1976]. In: www.it.cas.cz [online]. [cit. 2016-12-13] http://www.it.cas.cz/files/skripta/04_UVOD%20DO%20METODY%20KP-ocr150.pdf
- [7] Z. BAI, P. DEWILDE a R. FREUND: Reduced Order Modeling. In: Www.math.ucdavis.edu [online]. [cit. 2016-12-13] https://www.math.ucdavis.edu/~freund/paper_bdf.pdf
- [8] KUMAR, Sanjeev: Krylov Subspace Methods for the Eigenvalue problem. In: Www.cseweb.ucsd.edu [online]., [cit. 2016-12-13] <https://cseweb.ucsd.edu/classes/fa04/cse252c/sakumar.pdf>
- [9] NOTAY, Y: The Jacobi–Davidson method. In: Www.homepages.ulb.ac.be [online]. 2004 [cit. 2016-12-13] http://homepages.ulb.ac.be/~ynotay/PDF/2006_GAMM.pdf
- [10] Multilevel Fast Multipole Method [online]. <http://www.efieldsolutions.com/>, 2014 [cit. 2016-12-13] <http://www.efieldsolutions.com/mlfmm.php>
- [11] LORENZ, Petr: Transmission Line Matrix (TLM) [online]. Mnichov, 2007 [cit. 2016-12-13] <https://mediatum.ub.tum.de/doc/605039/605039.pdf>

-
- [12] CST MICROWAVE STUDIO - Transient Solver in CST MICROWAVE STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-17]. <https://www.cst.com/products/cstmws/Solvers/TransientSolver>
- [13] CST MICROWAVE STUDIO - Frequency Domain Solver in CST MICROWAVE STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-17]. <https://www.cst.com/products/cstmws/Solvers/FrequencyDomainSolver>
- [14] CST MICROWAVE STUDIO - Eigenmode Solver in CST MICROWAVE STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-17]. <https://www.cst.com/products/cstmws/Solvers/EigenmodeSolver>
- [15] CST MICROWAVE STUDIO - TLM Solver in CST MICROWAVE STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-17]. <https://www.cst.com/products/cstmws/Solvers/TLM-Solver>
- [16] CST MICROWAVE STUDIO - Integral Equation Solver in CST MICROWAVE STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-17]. <https://www.cst.com/products/cstmws/Solvers/IntegralEquationSolver>
- [17] CST MICROWAVE STUDIO - Asymptotic Solver in CST MICROWAVE STUDIO Cst.com [online]. Germany: CST Computer Simulation Technology, 2010 [cit. 2017-04-17]. <https://www.cst.com/products/cstmws/Solvers/AsymptoticSolver>
- [18] CST Studio Suite: Training Class: MW Antenna Module [pdf]. CST Computer Simulation Technology, 2016, 2016(1) [cit. 2017-04-13].
- [19] CST Studio Suite: Getting Started [pdf]. CST Computer Simulation Technology, 2016, 2016(1-6) [cit. 2017-04-13].

Přílohy:

- I. Příručka pro práci v CSTSS, Design a Microwave Studio (59 Stran)
- II. Video tutoriál konstrukce antény Yagi-Uda a nastavení simulace (8:48 min.)



Katedra
telekomunikační techniky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava

Práce s programem CST Studio Microwave

Příručka pro práci v CSTSS, Design a Microwave
Studios

Datum: 18. dubna 2017
Autor: René Gruszkowski
Kontakt: rgruszkowski@seznam.cz
Předmět: Bakalářská Práce - Příloha

Obsah

1	Popis práce v CSTSS	3
1.1	Vytvoření nového projektu	3
1.2	Vzhled pracovní plochy	8
1.3	Vytvoření vlastního modelu	10
1.3.1	Parametrizace	10
1.3.2	Geometrie, vytváření základního tvaru	11
1.3.3	Geometrie, kombinování tvarů	12
1.3.4	Geometrie, transformace	14
1.3.5	Výběr a přiřazení materiálu	16
1.3.6	Nástroje pro výběr bodů, hran a stěn	17
1.3.7	Lokální souřadnicový systém	18
1.3.8	Křivky	19
1.3.9	Strom Historie Operací	20
1.3.10	Definování portů	21
1.4	Historie	23
1.5	Definování hraničních a symetrických podmínek	24
1.6	Mřížkování	26
1.6.1	Zobrazení mřížkování	26
1.6.2	Hexahedralní mřížkování	27
1.6.3	Lokální mřížkování	28
1.6.4	Tetrahedrálční a povrchové mřížkování	29
1.7	Výběr a nastavení řešiče	31
1.7.1	Integral Equation Solver	33
1.7.2	Časový řešič	34
1.7.3	Frequency Domain Solver	35
1.8	Monitory	36
1.9	Postprocessing	37
1.9.1	Analýza S-parametru	37
1.9.2	Analýza výsledků, použití Adaptivní jemnosti mřížkování	38
1.9.3	2D/3D Analýza	39
1.9.4	Analýza vzdáleného pole	41
1.9.5	Šablony pro postprocessing	42
1.10	Optimalizace	43
2	Vytvoření a simulace vlastního modelu antény	46

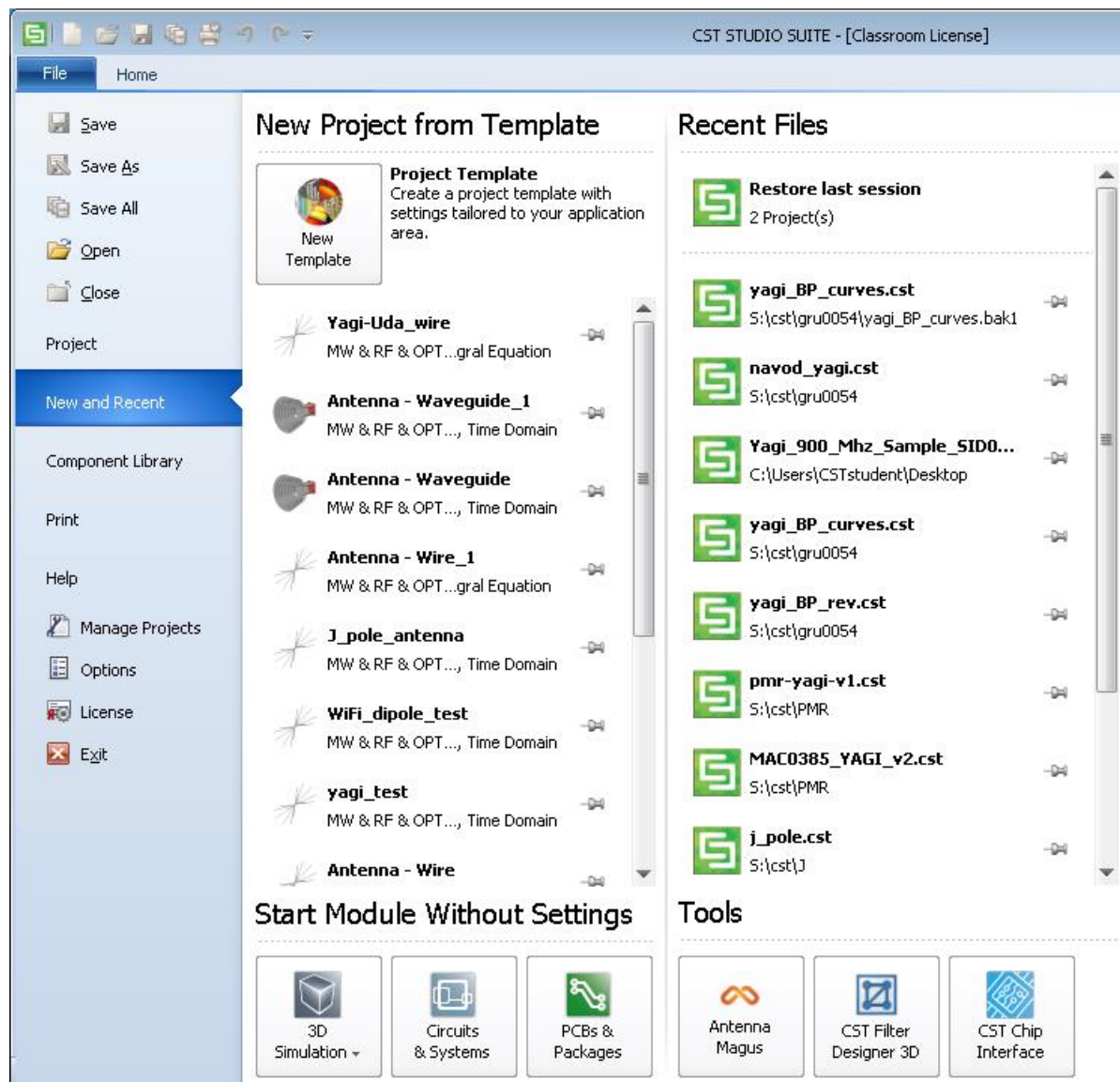
2.1	Návrh antény	46
2.2	Vytvoření modelu antény	47
2.2.1	Nový projekt	47
2.2.2	Vytvoření modelu	49
2.3	Podmínky hranic a symetrie	53
2.4	Nastavení monitorů	54
2.5	Mřížkování	55
2.6	Nastavení řešiče a spuštění simulace	56
2.7	Výsledky simulace	57
2.8	Optimalizace	58

Literatura	60
-------------------	-----------

1 Popis práce v CSTSS

1.1 Vytvoření nového projektu

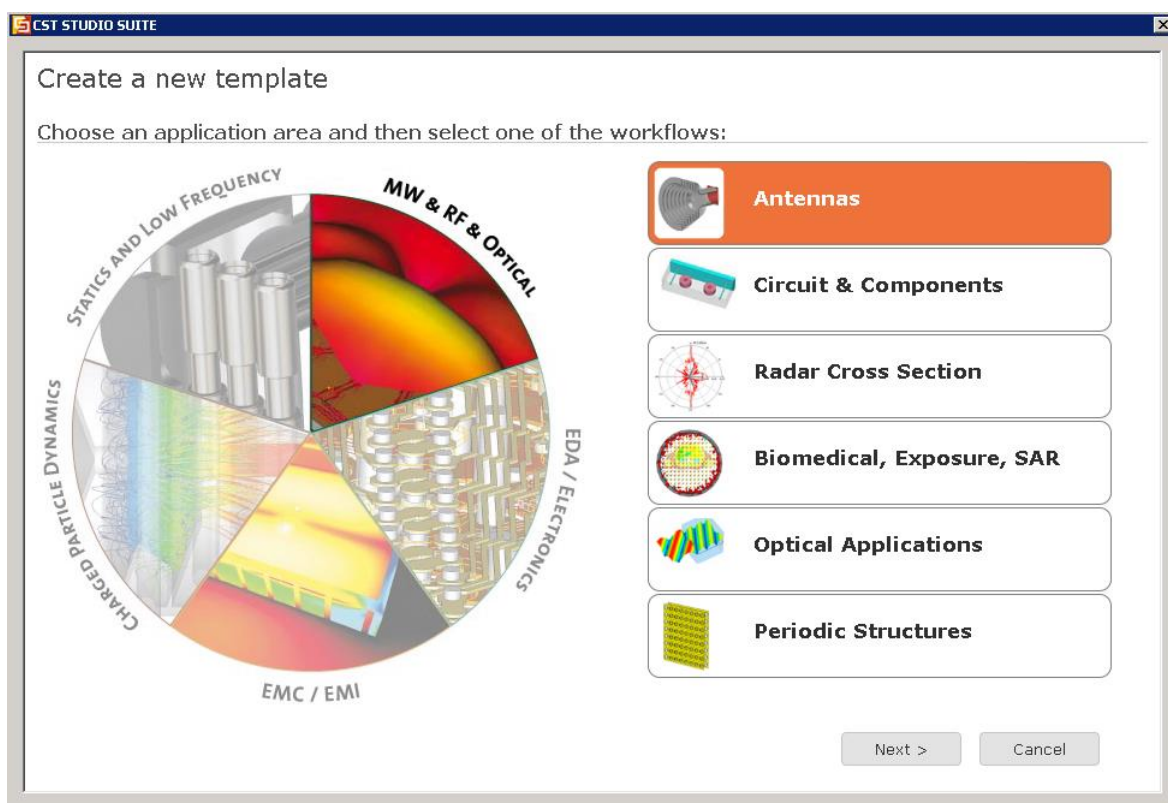
Při spuštění CSTSS jsme přivítání následující obrazovkou.



Obrázek 1: CSTSS - Hlavní okno.

CST Studio nám zde dává na výběr mezi spuštěním některého z posledních projektů na kterých jsme pracovali, vytvoření nového projektu a rychlému přístupu ke vzorům pro nové projekty. Spodní část nám dává na výběr spuštění modulu bez nastavení a nástroje, které například obsahují spuštění programu Antenna Magus.

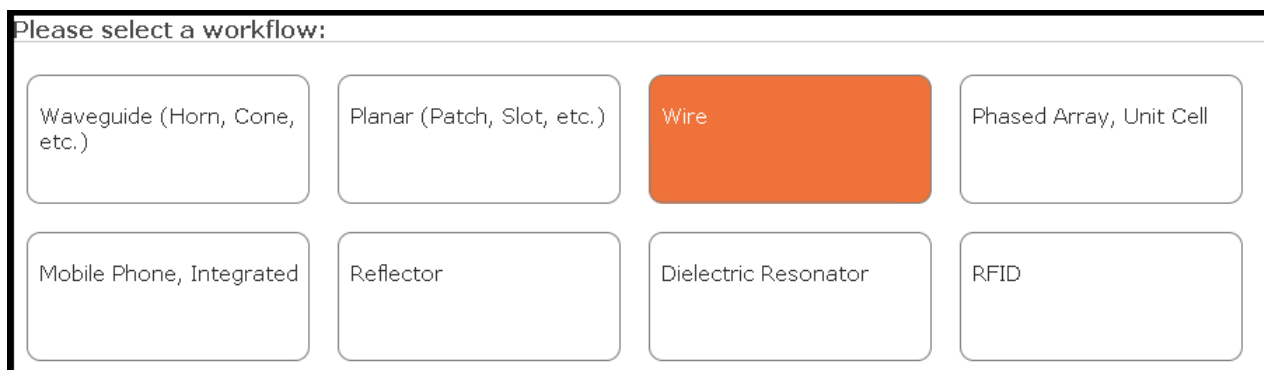
Při výběru nového projektu pomocí kliknutí na ikonu **Create a new project** se nám zobrazí následující nabídka:



Obrázek 2: Výběr oblasti uplatnění.

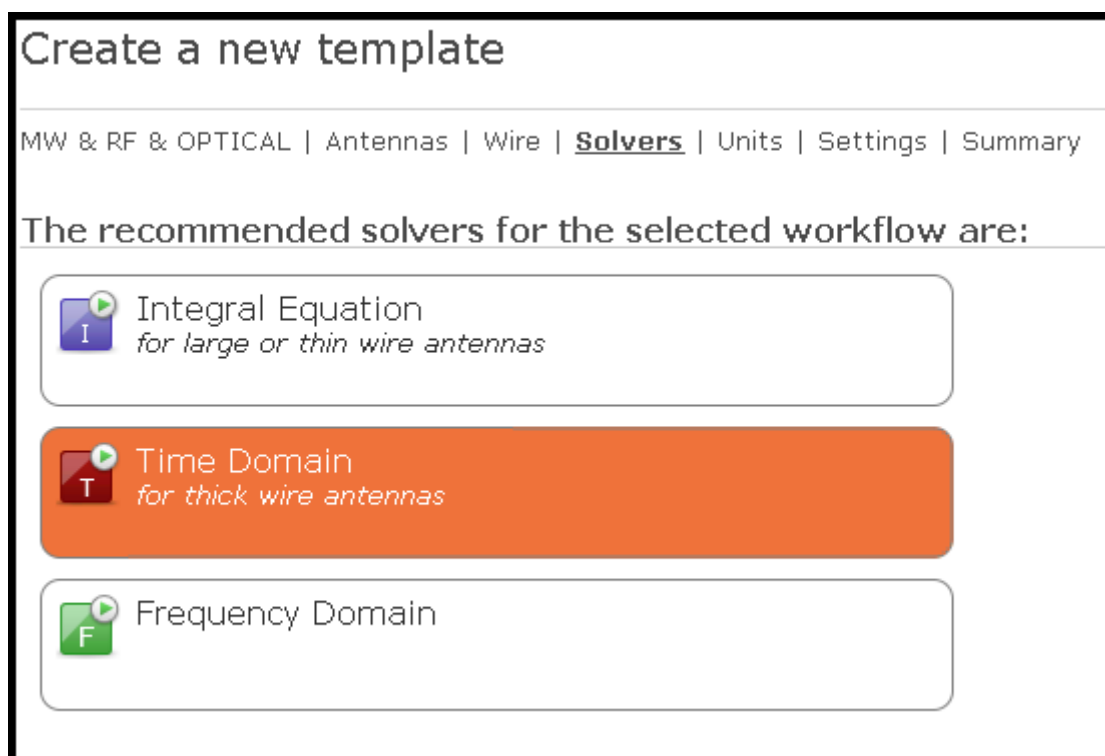
Zde můžeme pomocí přehledného uživatelského prostředí vybrat oblast, ve které chceme pracovat. Pro naše potřeby: **MW and RF and Optical** a následně **Antennas**.

Následující krok je výběr konkrétního typu antény, se kterou chceme pracovat.



Obrázek 3: Výběr typů antén (Vlnovodivé, planární, ..)

Dle předchozího výběru oblasti naší simulace nám CSTSS nabídne výběr vhodných řešičů.



Obrázek 4: Výběr typů antén (Nabízené řešiče)

1. **Integral Equation Solver** - věnován elektricky složitým konstrukcím, které jsou řízeny kovem. Dielektrika, ztrátové a bezetrátové mohou být rovněž zváženy.
2. **Time Domain Solver** - 3D EM simulátor s obecným účelem. Simulace v reálném čase je užitečná pro studium pole rozšiřující se komponentem nebo po stopách PCD a může být použita ve velkém množství EM aplikací.
3. **Frequency Domain Solver** - Nástroj s obecným zaměřením. Dokáže vypočítat S-parametry ale i blízké a vzdálené pole. Vhodný pro práci s elektricky malými strukturami nebo zařízeními, které mají vysokou hodnotu činitele kvantity (Q). Jeho unikátní vlastnost je možnost přepnutí z Kartézského na čtyřboké mřížkování. Mimo zobrazení segmentace na zakřiveném povrchu, povrchové mřížkování zvyšuje přesnost a rychlost.

Pozn. Typ a nastavení řešiče může být později změněno.

V předposledním okně můžeme změnit nastavení jednotek projektu.

Create a new template

MW & RF & OPTICAL | Antennas | Wire | Solvers | **Units** | Settings | Summary

Please select the units:

Dimensions:	mm
Frequency:	MHz
Time:	ns
Temperature:	Celsius
Voltage:	V
Current:	A
Resistance:	Ohm
Conductance:	S
Inductance:	nH
Capacitance:	pF

Obrázek 5: Nastavení jednotek projektu

Můžeme změnit v jakých jednotkách budou parametry rozměru našeho modelu (mm, cm, m, ..), frekvenci, čas, teplotu, napětí, proud, odpor, kondukcí, indukci a kapacitu.

Poslední krok nastavení se zabývá nastavení rozsahu frekvence a nastavení monitorů.

Create a new template

MW & RF & OPTICAL | Antennas | Wire | Solvers | Units | **Settings** | Summary

Please select the Settings

Frequency Min.:

MHz

Frequency Max.:

MHz

Monitors:

☒ E-field ☒ H-field ☒ Farfield ☐ Power flow ☐ Power loss

Define at

MHz

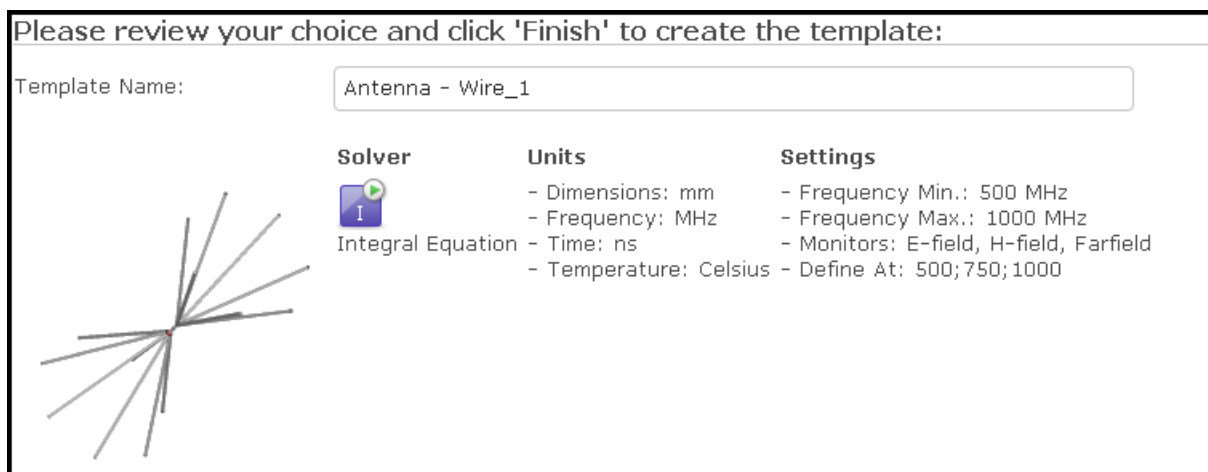
Use semicolon as a separator to specify multiple values.
e.g. 20;30;30.1;30.2;30.3

Obrázek 6: Nastavení jednotek projektu

Definujeme frekvenční rozpětí, ve kterém se budeme pohybovat a může zapnout monitory pro elektrické, magnetické, blízké a vzdálené pole, průtok a ztrátu výkonu.

Pozn. Frekvenční rozpětí může být změněno později. Také monitory mohou být přidány a odstraněny.

Poslední krok vytvoření nového projektu je shrnutí dosavadního nastavení a pojmenování nového vzoru.



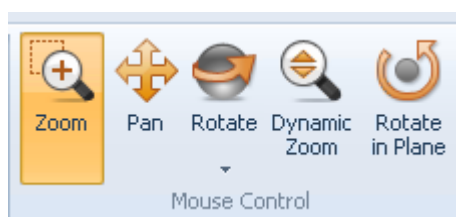
Obrázek 7: Shrnutí nastavení projektu

Vybrali jsme si anténu skládající se z vodiče (dipol, bipol, ..), IES, rozměry v milimetrech, frekvence v MHz s rozpětím mezi 500 a 1000 MHz s E, H monitory a monitory vzdáleného pole pro 500, 750 a 1000 MHz.

Pozn. Veškeré nastavení vzoru může být později změněno.

1.2 Vzhled pracovní plochy

Pro lehčí a přehlednější modelování CST nabízí změnu a přizpůsobení vzhledu a pohledu na pracovní plochu. Slouží k tomu záložka **View**.



Obrázek 8: Záložka View - Mouse Control.

Změnit pohled můžeme kdykoliv. Změna proběhne, když máme zvolený některý mód z nabídky Mouse Control, držíme levé tlačítko myši a táhneme. Módy, které máme k dispozici:

- Zoom (přiblížení) - v tomto módu můžeme vybrat okno přidržením levého tlačítka myši a tažením, když tlačítko pustíme vybraná oblast se nám zvětší na celou obrazovku. Přibližovat a oddalovat můžeme rovněž pomocí kolečka na myši.
- Pan (Posun) - při podržení levého tlačítka myši můžeme posouvat celou pracovní plochu čtyřmi směry.

- Rotate (otočení) - při přidržení levého tlačítka myši můžeme rotovat celou strukturou. Centrum otáčení je vyznačeno červeným bodem a rotovat můžeme všemi směry dle pohybu kurzoru.
- Dynamic zoom (dynamické přiblížení) - přidržíme levé tlačítko myši, když myši pohneme směrem nahoru, tak strukturu oddálíme, pohybem směrem dolů naopak přiblížíme.
- Rotate in plane (otáčení v rovině) - přidržením levého tlačítka myši můžeme strukturu otáčet v rovině kolem své osy.

Přiblížení může být vráceno na původní hodnotu pomocí funkce **Reset view** z nabídky **Change View** nebo klávesou mezerník. Vzhledem k tomu, že operace změny pohledu jsou často využívány, existují i klávesové zkratky.

- Ctrl: Mód otáčení (rotate)
- Ctrl: Mód otáčení v rovině (rotate in plane)
- Shift + Ctrl: Mód posunu (pan)

Nabídka **Change view** nám kromě funkce **Reset view** nabízí možnost vypnutí a zapnutí orthografického pohledu, změnu měřítka os a také nabídku předdefinovaných úhlů pohledu.

Záložka **View** také nabízí možnost vypnutí a zapnutí zobrazení os (Axes), Ohraničení (Bounding box), Popisků a jmenovek (Texts and Labels), Pracovní roviny (Working plane) a zobrazení pouze hran modelu (Wire frame). Také můžeme zobrazit a schovat jednotlivé komponenty - Porty, dielektrika a kovy. Funkce **View options** (Alt+V) nám nabízí možnost změnit barvy, font, šířky čar, průhlednost a další nastavení dostupné přímo ze záložky View.

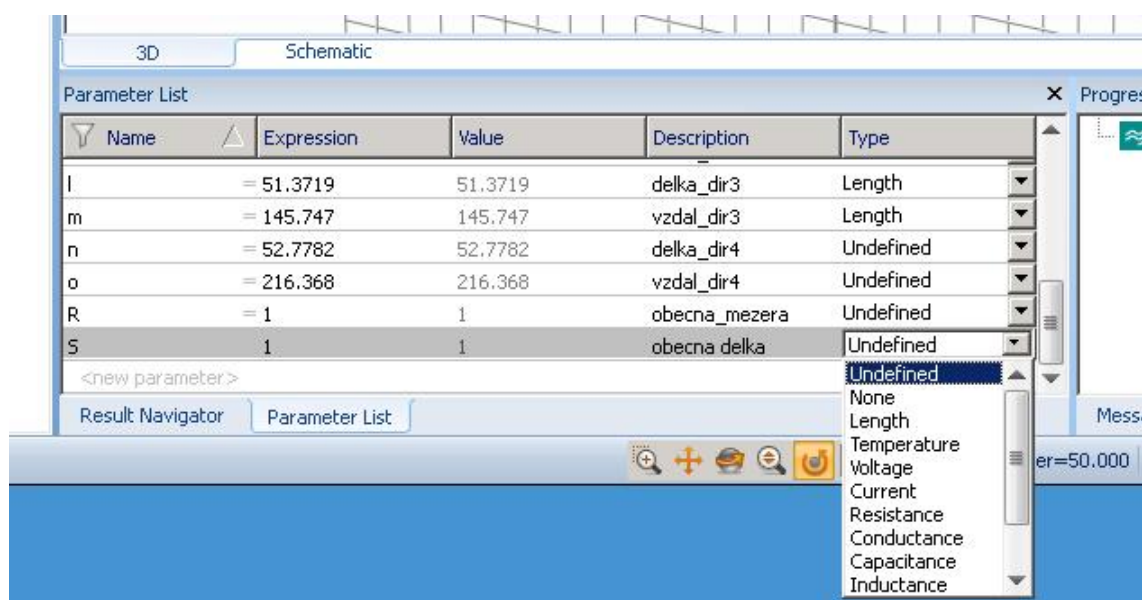
1.3 Vytvoření vlastního modelu

Po vytvoření nového projektu můžeme pokračovat vytvořením vlastního modelu. CSTSS rovněž nabízí možnost importování již vytvořeného modelu například z programu Antenna Magus.

1.3.1 Parametrizace

Využívání parametrizace je klíčové pro pozdější proces optimalizace. Také využívání parametrů při konstrukci modelů nám zjednoduší zápis parametrů modelu a ulehčí případné změny v parametrizaci struktury.

Okno s parametry můžeme nalézt ve spodní části pracovní plochy. Seznam parametrů má 5 oken. Jméno (name) parametru, výraz (expression), hodnotu (value), popis (description) a typ (type).



Obrázek 9: Okno pro parametrizaci

- Jméno parametru popřípadě zkratka, kterou budeme využívat v například modelování.
- Do výrazu zapisujeme hodnotu parametru nebo vzorec pro výpočet hodnoty (například "R*o+5").
- Hodnota nemůže být zapsána, přenáší se z políčka výraz.
- Popis je určen pro popsání parametru.
- Typ nám nabízí seznam typů parametrů (Délka, teplota, napětí, proud, odpor, ..). Můžeme vybrat i nedefinováno a žádné.

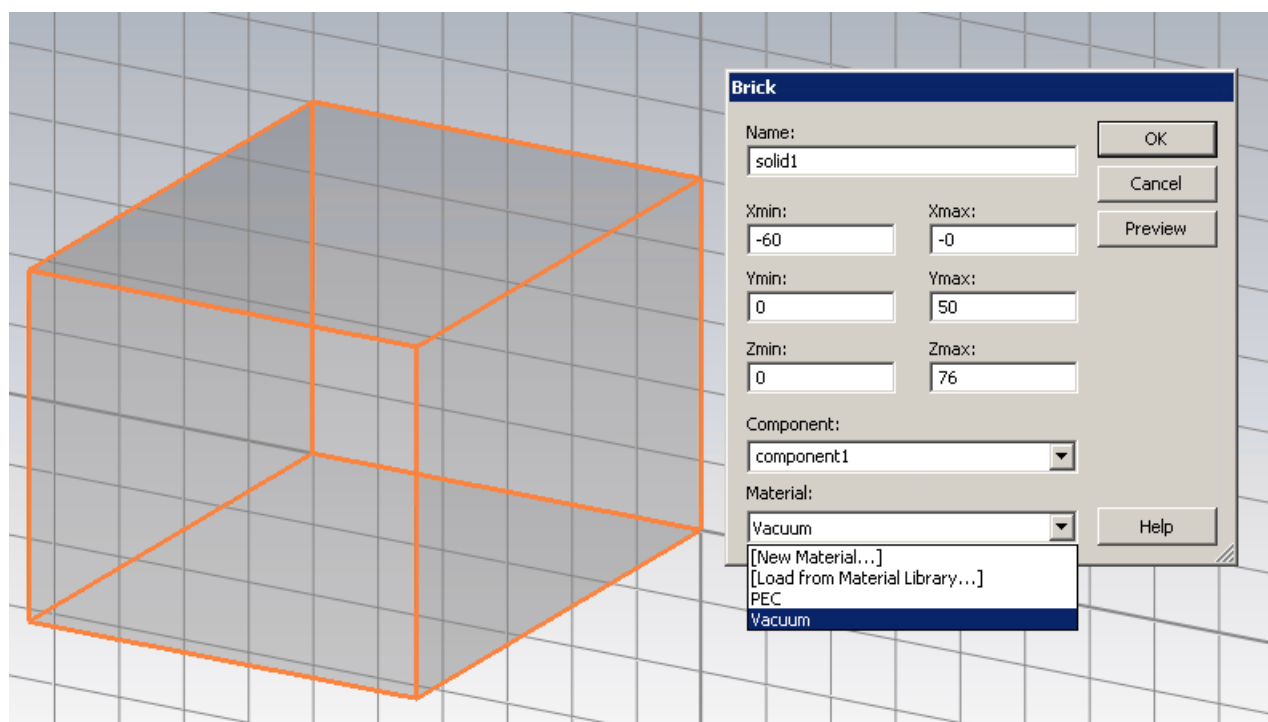
*Pozn. Jednotky typů parametrů mohou být změněny v záložce **Home - Units**.*

1.3.2 Geometrie, vytváření základního tvaru

Modelujeme pomocí položek záložky **Modeling**. Tato záložka nabízí základní geometrické tvary, pomocné funkce k vytváření složitějších geometrických těles a funkce určené k modifikaci typu ohybu, transformování a podobné. Rovněž máme možnost pro modelování využít 2D křivky.

Pro vytvoření jednoduché krychle využijeme nabídku shapes, kde zvolíme naše požadované geometrické těleso - **Brick**. Po zvolení tělesa se nám na pozici kurzoru v zakreslovací rovině objeví červená tečka, která indikuje počáteční bod tělesa. Dvojklikem vybereme počáteční bod. Další krok je zvolení opozičního bodu, rovněž potvrdíme dvojklikem. Vzhledem k tomu, že pracujeme s 3D objekty, posledním krokem je zvolení šířky tělesa tažením myši na požadovanou šířku. Po potvrzení se zobrazí dialogové okno zobrazující numerické koordinační hodnoty vybraných bodů.

Pozn. Klávesou TAB při výběru pozice bodu se otevře okno, kde můžeme zadat numerickou hodnotu souřadnice bodu či parametr.



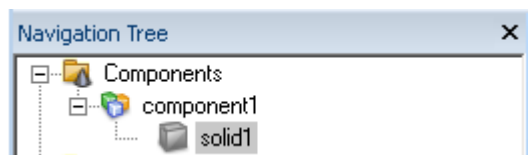
Obrázek 10: Vytvořené těleso s jeho kontextovou nabídkou

Kontextovou nabídku je možné vyvolat ihned po vybrání tělesa či křivky bez nutnosti vybírání bodů 1,2 a 3 stisknutím klávesy ESC. Poté můžeme ihned manuálně vyplnit parametry Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, Zmin, Zmax pomocí parametrů, které jsme si nadefinovali v našem seznamu parametrů.

- Name: Jméno tvaru, pro přehlednost je lepší změnit jméno z původního "solidX"
- Xmax/min: Souřadnice na ose X, kde těleso začíná a končí.
- Ymax/min: Souřadnice na ose Y, kde těleso začíná a končí.

- Zmax/min: Souřadnice na ose Z, kde těleso začíná a končí.
- Component: Do kterého komponentu těleso patří.
- Material: Z jakého materiálu se těleso skládá. Je možné kdykoliv později změnit.

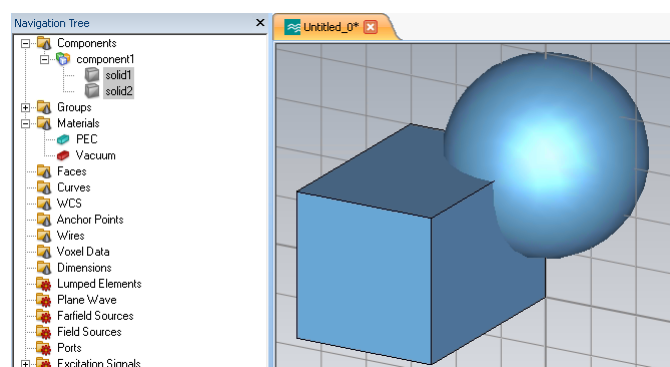
Vytvořené objekty se nám zobrazí v navigačním stromě ve složce **Components**, kde s nimi můžeme dále pracovat (měnit jejich vlastnosti, transformovat, přiřadit materiál, ..)



Obrázek 11: Navigační strom - Komponenty

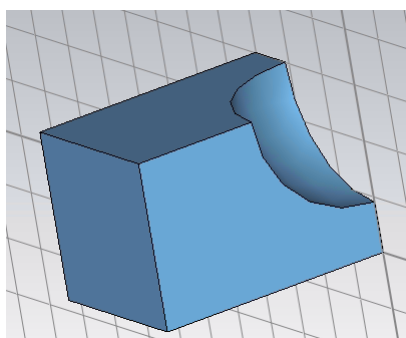
1.3.3 Geometrie, kombinování tvarů

Jednoduché tvary můžeme kombinovat a tvořit tak tvary složitější pomocí boolean (logických) funkcí. Pro demonstraci využijeme dva základní tvary: Hranol (Brick) a Koule (Sphere). Boolean funkce najdeme v nabídce **Tools - Boolean**.



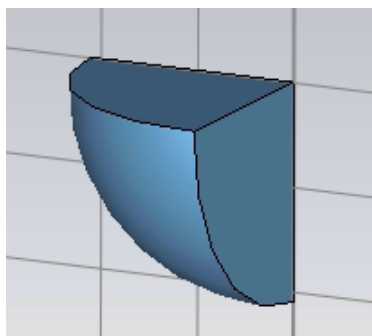
Obrázek 12: Hranol a koule - Funkce Add

1. Add (přidání) - spojí vybrané tvary v jeden. (Viz. obrázek 7.11) Z vybraných objektů Solid1 a 2 vzniká Solid1.
2. Subtract (odečtení) - Z hranolu odečteme část, která se protíná s koulí.



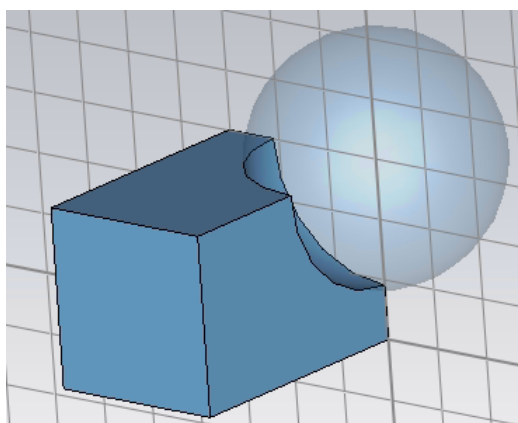
Obrázek 13: Hranol a koule - Funkce Subtract

3. Intersect (protnutí) - Vytvoření jednoho tělesa z protnutí hranolu a koule.



Obrázek 14: Hranol a koule - Funkce Intersect

4. Insert (vlození) - Druhý vybraný objekt se vloží do prvního. Oba objekty zůstanou s tím rozdílem, že se neprotínají.



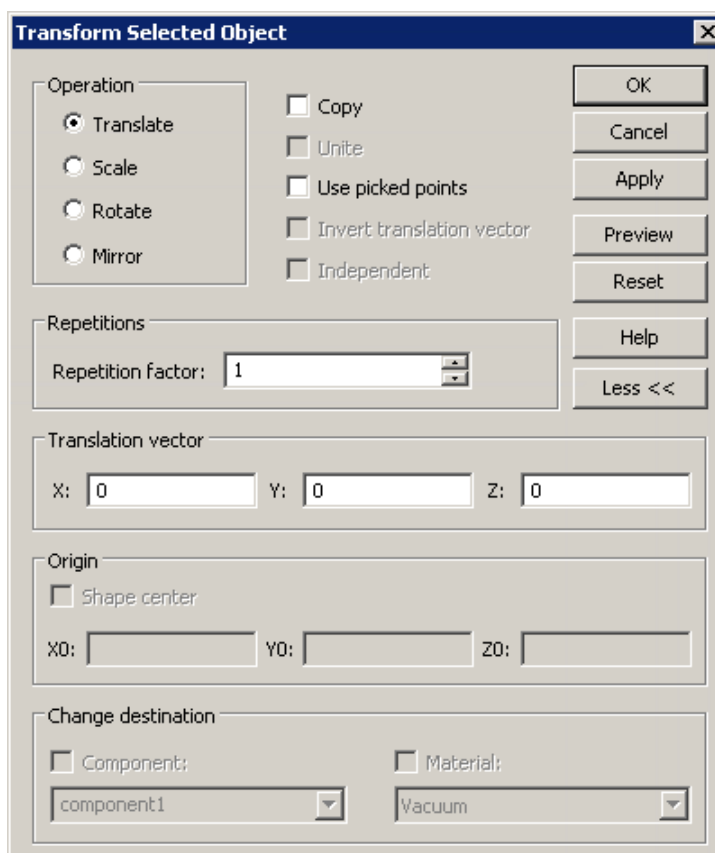
Obrázek 15: Hranol a koule - Funkce Insert

Boolean operace jsou dostupné až po vybrání prvního tvaru. Po výběru boolean operace je nutno zvolit druhý tvar, se kterým má být operace provedena.

Při výběru několika tvarů je možno využít operace **Add** pro jejich spojení v jeden. Rovněž je možno vybrat více než jeden tvar při volbě druhého tvaru po výběru boolean operací **subtract**, **intersect** a **insert**.

1.3.4 Geometrie, transformace

Transformace jsou dostupné po výběru objektu z nabídky **Tools - Transform**.

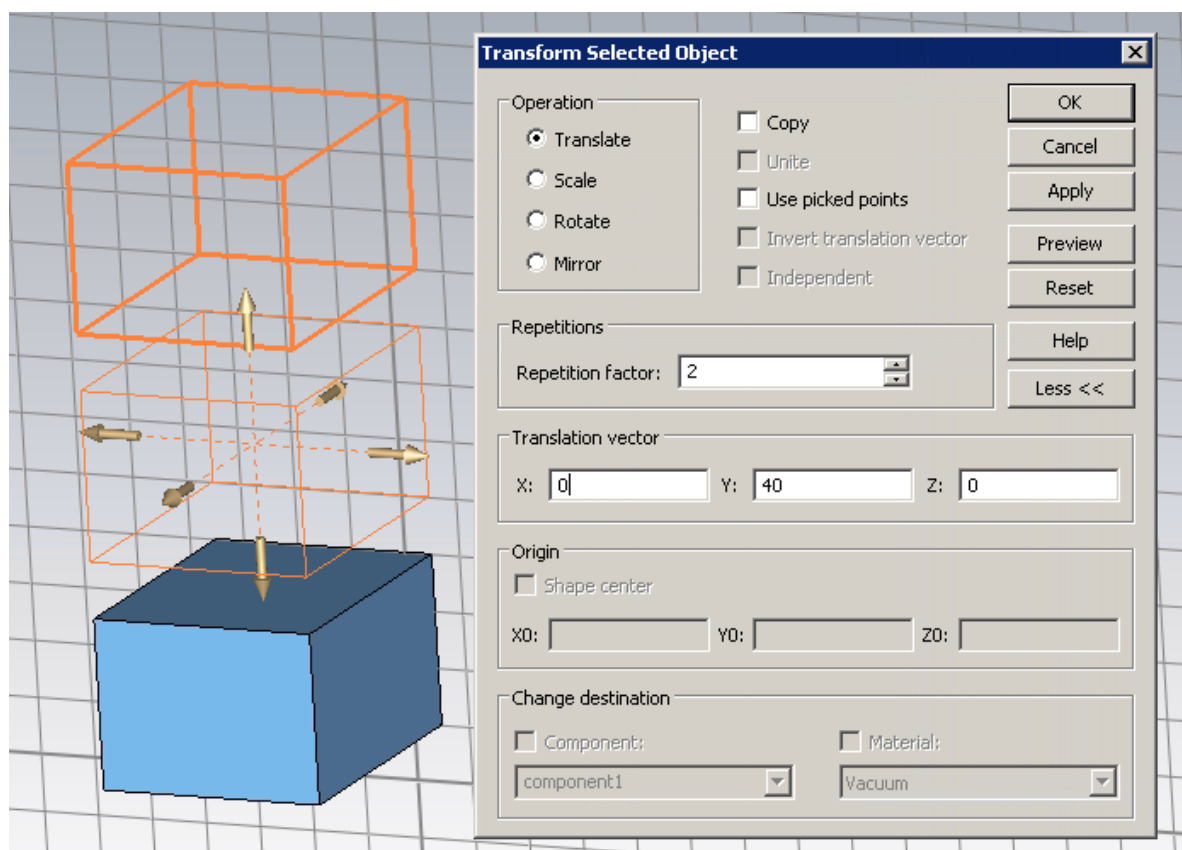


Obrázek 16: Tools - Transform dialogové okno

A nabízí nám 4 funkce

1. Translate (posun) - Funkce pro vektorové posunutí objektu po osách X,Y a Z.
2. Scale (změna velikosti) - Funkce pro změnu velikosti objektu. Při odškrtnutí checkboxu Scale uniform můžeme měnit velikosti stran nezávisle na sobě.
3. Rotate (otočení) - Funkce pro otáčení objektu kolem osy o fixní úhel. Dále je možno specifikovat střed otáčení pomocí okna **Origin**.
4. Mirror (odraz) - Funkce pro vytvoření odrazu vybraného tvaru. Můžeme měnit úhel odrazu od zrcadla i jeho pozici.

Pro všechny transformace můžeme specifikovat, zda-li má být původní tvar ponechán nebo odstraněn. Rovněž můžeme vytvořit kopie objektu a jejich počet specifikovat pomocí **Repetition factor** (počet opakování). Transformace mohou být prováděny buď vyplňováním políček v kontextovém okně nebo tažením myši za úchyty, které se zobrazí na objektu v hlavním okně.

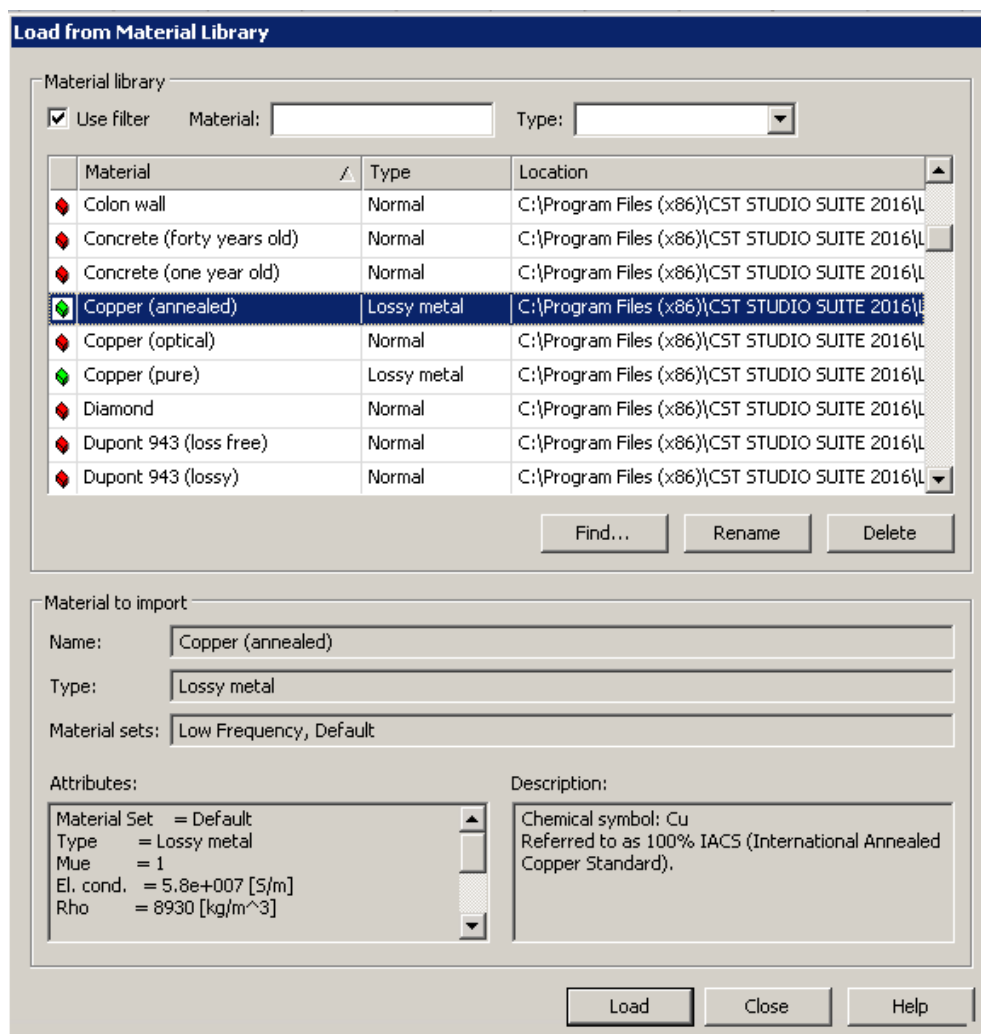


Obrázek 17: Transform - Posunutí

1.3.5 Výběr a přiřazení materiálů

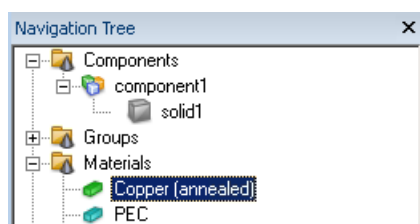
CSTSS nám již dopředu nabízí širokou knihovnu různých materiálů. Rovněž nám nabízí možnost si definovat vlastní nové materiály s námi potřebnými vlastnostmi. Vybrat a přiřadit materiál objektu je možno mnoha způsoby.

Možnost práce s knihovnou materiálů máme například ze záložky **Modeling**, který nám nabízí podnabídku **Materials**. V ní můžeme nastavit materiál, ze kterého se skládá pozadí celého projektu, otevřít knihovnu materiálů a přidat nový materiál.



Obrázek 18: Knihovna materiálů

V knihovně materiálů máme k dispozici filtr pro vyhledávání a filtrování materiálů, které potřebujeme. Při označení požadovaného materiálu se nám ve spodním okně knihovny zobrazí jeho atributy a popis. Po potvrzení našeho výběru kliknutím na tlačítko **Load** můžeme náš materiál najít v navigačním stromu v záložce **Materials**.

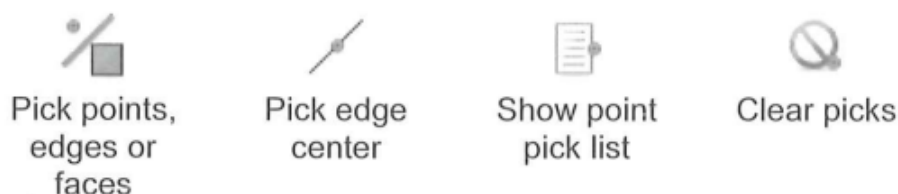


Obrázek 19: Navigační strom - Materiál

Materiál zde můžeme přiřadit jednoduchým přetažením materiálu v navigačním stromu na objekt ze složky komponentů. Materiál může být přiřazen i v kontextové nabídce objektu při jeho vytvoření nebo pravým kliknutím na objekt v navigačním stromu a zvolení možnosti **Change material**.

1.3.6 Nástroje pro výběr bodů, hran a stěn

Mnoho operací vyžaduje výběr hran, stěn nebo bodů objektu. CSTSS obsahuje nástroje pro lehký výběr toho co požadujeme. Tyto nástroje jsou dostupné ze záložek **Modeling** a **Simulation - Picks**.

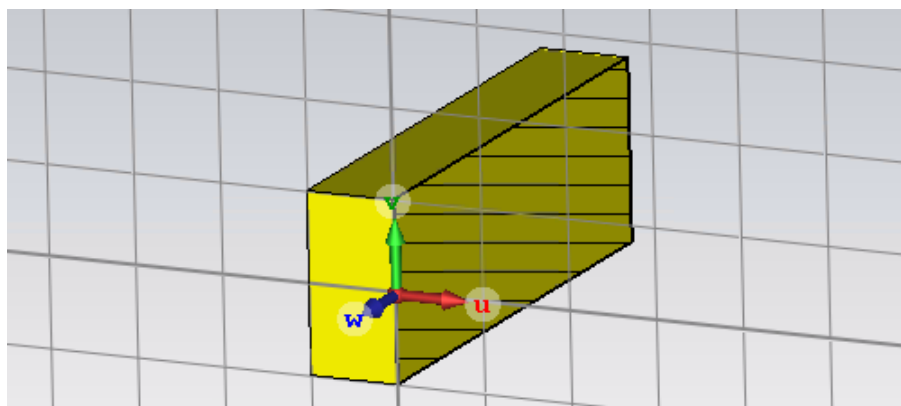


Obrázek 20: Modeling - Picks

Při spuštění výběrového nástroje se změní kurzor a zaměřené hrany či stěny objektu se zvýrazní pro lepší přesnost a přehlednost. Potvrzení výběru je dvojklikem, zrušení je klávesou ESC. Vybírat můžeme pouze v právě označeného objektu. Změnit označený objekt můžeme v navigačním stromě.

1.3.7 Lokální souřadnicový systém

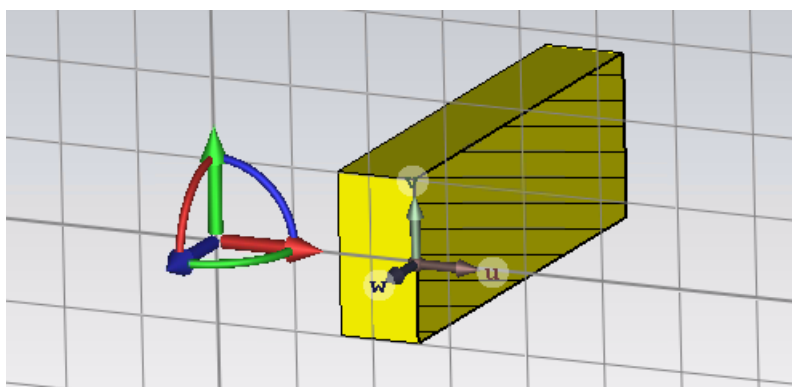
Pro zlepšení flexibility práce v CSTSS máme možnost využít lokální souřadnicový systém (WCS). Dostupný v záložce **Modeling - WCS**.



Obrázek 21: Lokální souřadnicový systém

Pomocí možnosti **Align WCS** můžeme přiřadit WCS na námi požadovanou hranu, stěnu nebo libovolný bod v našem návrhu. Toto nám ulehčí práci vzhledem k tomu, že dokud WCS nezrušíme, tak se využívají nově zvolené osy W,U,V s počátkem v námi zvoleném bodě místo souřadnic X,Y,Z.

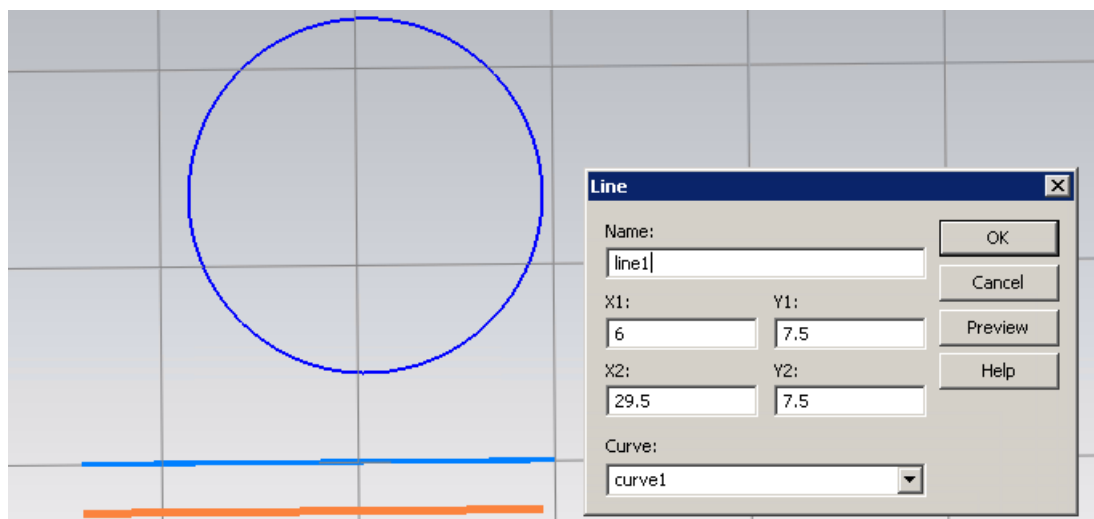
- WCS rovněž můžeme definovat manuálně pomocí **WCS - Local WCS - Local Coordinate System properties**: Manuálně nastavíme souřadnice pro počátek nového WCS
- Také můžeme počátek WCS posunout pomocí **WCS - Transform WCS** do nového bodu tažením myši po osách. Může být kombinováno s nástroji pro výběr.



Obrázek 22: WCS Transform

1.3.8 Křivky

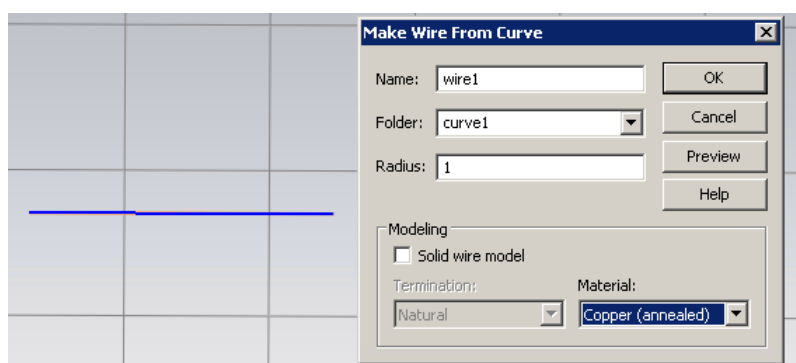
V CSTSS je možnost modelování nejen pomocí 3D těles, ale i 2D křivek, které následně mohou být využity pro pokročilé modelovací úlohy. Křivky vytváříme podobně jako 3D tělesa a jsou dostupné v záložce **Modeling - Curves**. Při otevření nabídky **Curves** máme na výběr z polygonu, čáry, kruhu, elipsy, oblouku a křivky.



Obrázek 23: Vytvoření křivky - čára

Vytvářet křivky můžeme podobně jako 3D tělesa. Zvolíme typ křivky, který chceme vytvořit z nabídky - **Curves: Create 2D Curve**. Následně můžeme stiskem ESC manuálně nadefinovat parametry křivky nebo pomocí dvojkliků a tažení myši zvolit jejich klíčové body. K vytvořeným křivkám máme k dispozici panel nástrojů dostupný rovněž v záložce **Modeling: Curves**.

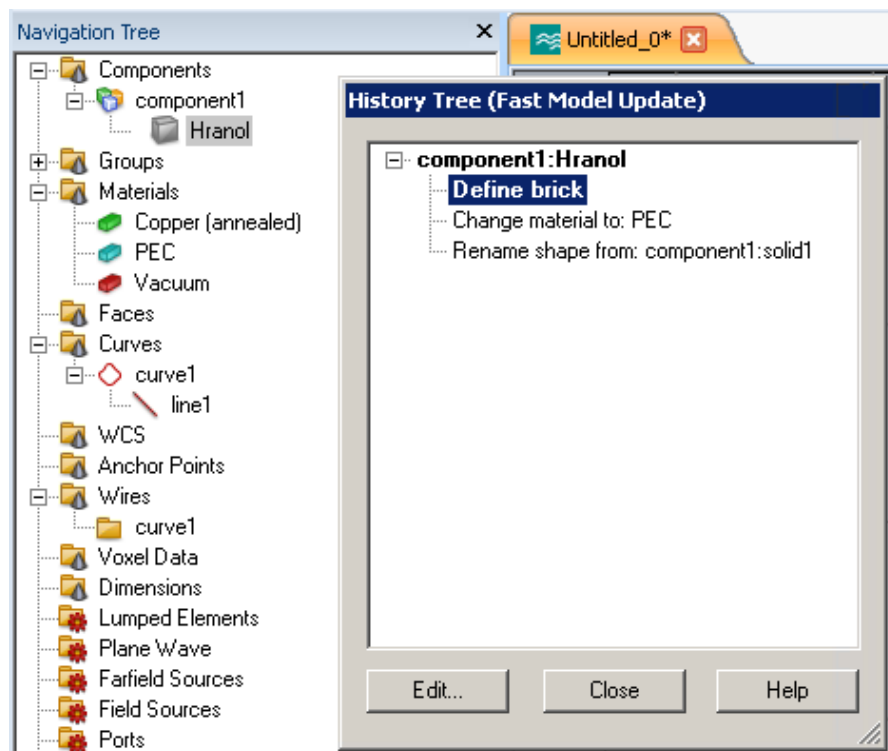
Křivky je možné použít například pro vytvoření modelu antény z vodiče, díky funkci proměny křivky na vodič. Dostupné v záložce **Modeling - Shapes: Wire from Curve**.



Obrázek 24: Vytvoření vodiče z křivky

1.3.9 Strom Historie Operací

Užitečným nástrojem v CSTSS je Strom Historie Operací (The History Tree). Používá se pro editaci již existujícího objektu. Můžeme jej otevřít dvojklikem na objekt v navigačním stromu a obsahuje historii všech změn daného objektu.



Obrázek 25: Strom Historie Operací

Dvojklikem na **Define: Brick** můžeme měnit parametry a pozici objektu. Možnost **preview** nám ukáže, jaké změny nastanou v případě aplikování.

1.3.10 Definování portů

Výpočet S-Parametru vyžaduje definování portu, přes které energie vstoupí a vystoupí ze struktury. Toto může být provedeno vybráním odpovídajících stěn pomocí nástrojů pro výběr před otevřením dialogového okna portů.

Výběr správného typu portů:

1. **Discrete edge ports** - Mohou být zobrazeny jako soustředěné elementy obvodu s interním rezistorem a paralelním zdrojem proudu. V závislosti na typu řešiče se skládají z jediného soustředěného elementu mezi dvěma dokonale elektricky vodivými vodiči, spojující port a strukturu nebo soustředěný rozložený port po celé hraně struktury. Může být definován jako zdroj napětí i proudu.
2. **Discrete face ports** - Velice podobné **Discrete edge portu**. Hlavní rozdíl je, že tento soustředěný element je reprezentován celou stěnou než jen jedním bodem či hranou. Jeho výhodou je nižší vlastní indukčnost.
3. **Waveguide ports** - Nabízí nejvyšší úroveň přesnosti díky jejich nízké úrovni odrazu a zkreslení. Díky tomu jsou nejlepší možností, když je potřeba vysoká přesnost.

Definování **Discrete edge portu**

1. Lokaci můžeme vybrat pomocí nástrojů pro výběr (Picks) či manuální definicí v dialogovém okně portu - část **Location**.
2. Výběr máme z 3 typů: S-Parameter, napětí a proud.
3. V případě S-Parametru vyplníme impedanci, u napětí V a u proudu A .
4. Jako radius můžeme zvolit hodnotu z našeho seznamu parametrů.
5. Zvolíme checkbox pokud máme zájem monitorovat i napětí a proud.

Discrete Edge Port

Properties

Port type: ☒ S-Parameter ☐ Voltage ☐ Current

Name: 1

Label:

Impedance: 50.0 Ohm

Radius: wire_diameter/2

☒ Monitor voltage and current

Location

Type: ☒ Coordinates ☐ Wire

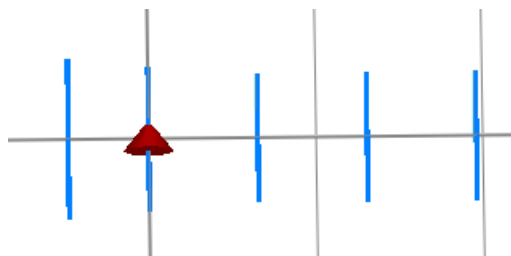
X1: 0,50 Y1: 0.000000 Z1: 0.000000 ☐ Use pick

X2: -0,50 Y2: 0.000000 Z2: 0.000000 ☐ Use pick

☐ Invert direction Position: end1

Obrázek 26: Discrete edge port

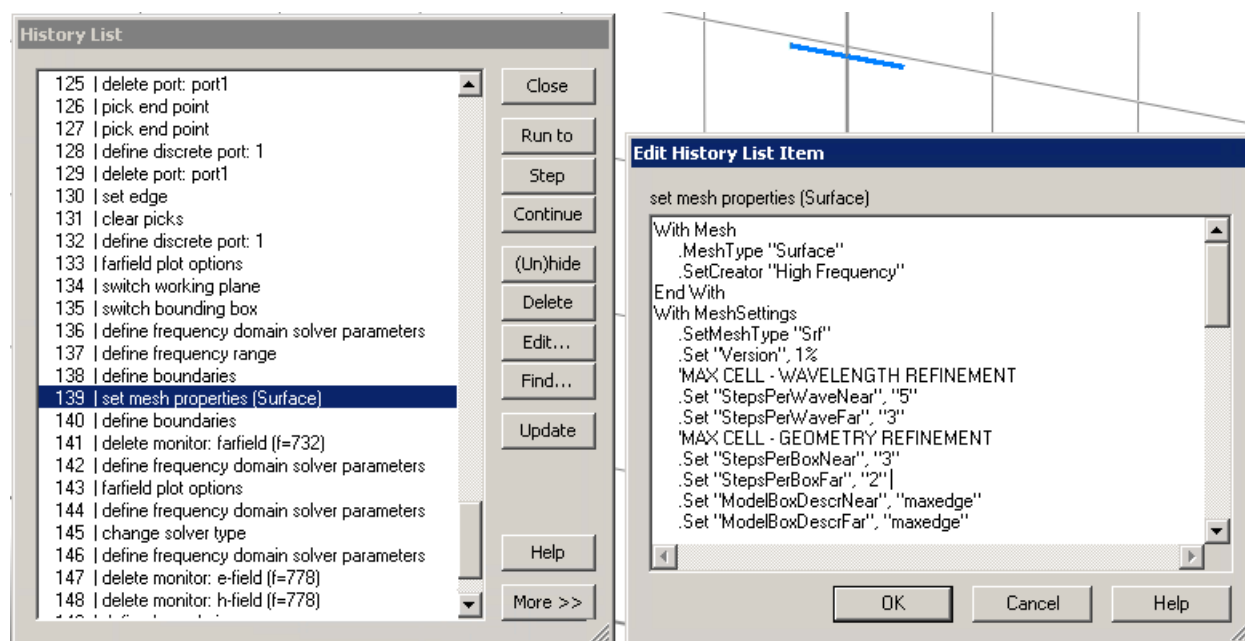
Porty můžeme nalézt v navigačním stromě v podsložce **Ports**. Přidaný port v hlavním okně vypadá následovně:



Obrázek 27: Definovaný port

1.4 Historie

Seznam historie uchovává všechny operace, které byly provedeny v rámci projektu. V seznamu je možnost filtrovat a prohlížet jednotlivé změny.

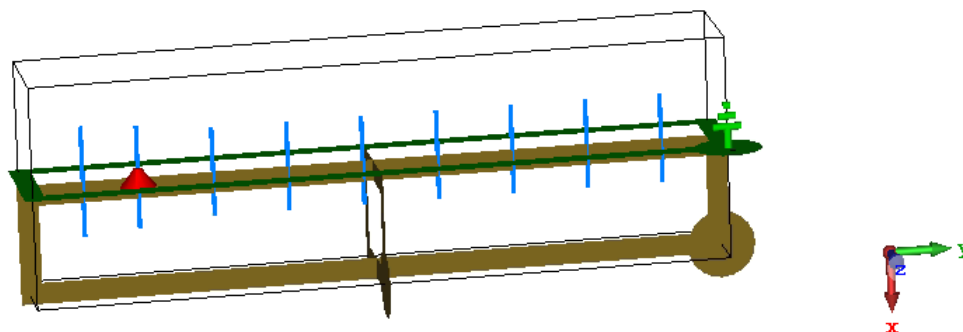


Obrázek 28: Seznam Historie

Záznamy můžeme editovat, mazat nebo dočasně skrýt. Seznam historie je dostupný ze záložky **Home: Edit - History List**.

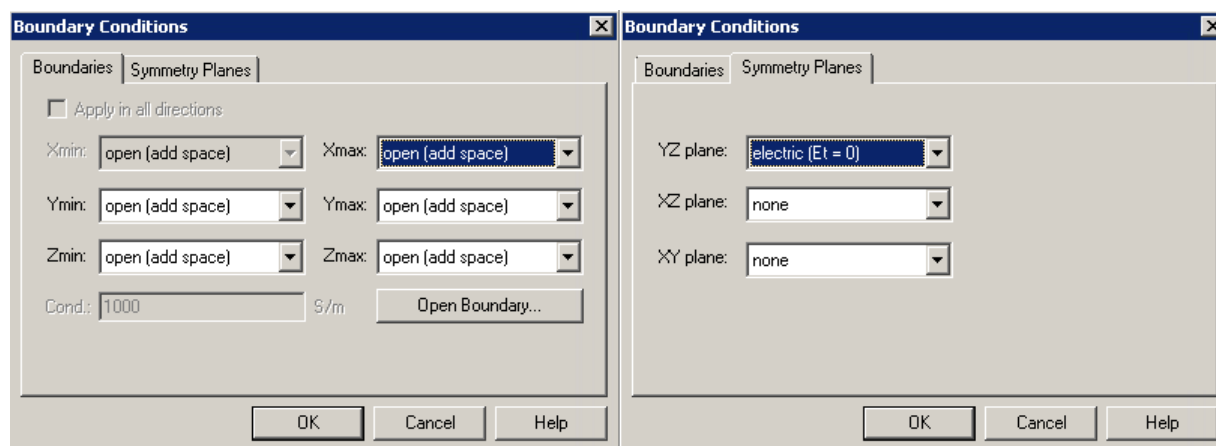
1.5 Definování hraničních a symetrických podmínek

Simulace struktury bude provedena pouze uvnitř ohrazení struktury. Ohrazení musí být nastaveno pro každou osu (Xmin/max, Ymin/max, Zmin/max). Tato podmínky definujeme v dialogovém okně pro ohrazení, dostupné z **Simulation: Settings - Boundaries**.



Obrázek 29: Ohrazení, ve kterém se bude provádět simulace

Když je dialogové okno otevřeno můžeme vidět ohrazení struktury v hlavním okně. Každé definování symetrie (symmetry planes) sníží čas simulace o faktor dvou.

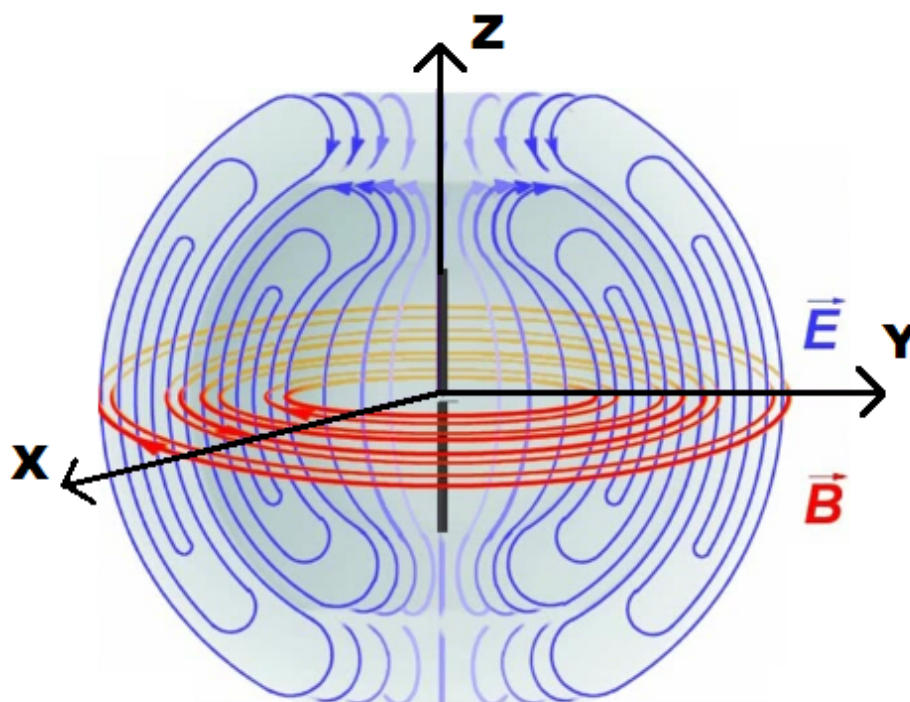


Obrázek 30: Nastavení ohrazení a symetrie

V závislosti na simulovaném objektu můžeme zmenšit simulovaný prostor. V tomto případě naopak volbou **Open (add space)** prostor zvětšíme. Nastavením symetrie můžeme značně urychlit čas simulace.

Správné nastavení symetrie závisí na dvou podmínkách. Struktura antény i její vyzařování musí být symetrické. Náš simulovaný objekt je symetrický, proto stačí provést simulaci pouze na jeho polovině, čímž snížíme simulační čas faktorem dvou, a nastavíme symetrii pro osy Y a Z, ve kterých je symetrický. Takže nastavíme symetrii pro rovinu YZ, změna se nám zobrazí ihned v náhledu.

Elektrickou ($E_t=0$) nebo magnetickou ($H_t=0$) symetrii určíme podle magnetických siločar a elektrického pole.

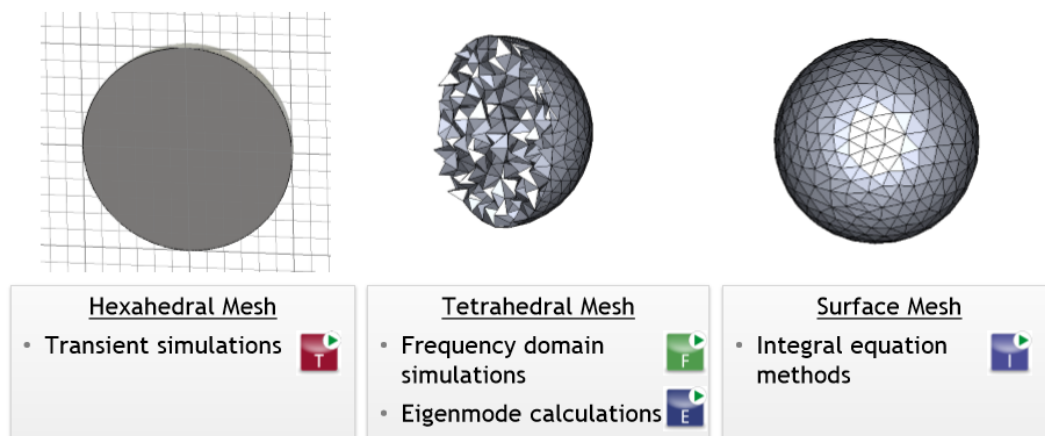


Obrázek 31: Elektromagnetické pole dipólu. [1]

Magnetické siločary jsou zobrazeny červeně. Na obrázku vidíme že jsou symetrické v rovině XY . Elektrické pole je zobrazeno modře a můžeme vidět že je symetrické v rovině XZ a YZ

1.6 Mřížkování

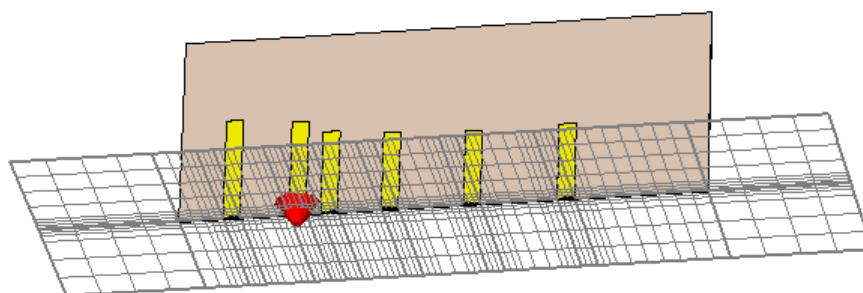
Různé typy algoritmů se hodí pro různé druhy mřížkování. Typy mřížkování můžeme zvolit v záložce **Simulation: Mesh - Global Settings** nabídce v závislosti na zvoleném řešiči.



Obrázek 32: Druhy mřížkování a jejich využití

1.6.1 Zobrazení mřížkování

Zobrazení mřížkování je dostupné ze záložky **Simulation: Mesh - Mesh View**. Struktura se nám zobrazí následovně:



Obrázek 33: Náhled typu mřížkování

Již zde vidíme, že se bere v potaz nastavení symetrie. V tomto módu můžeme měnit orientaci mřížkovací roviny pomocí kláves X Y a Z. Rovinu můžeme rovněž posouvat v rámci vybrané osy pomocí šipek na klávesnici. Současná pozice roviny může být zobrazena v **Mesh: Sectional View - Position field**.

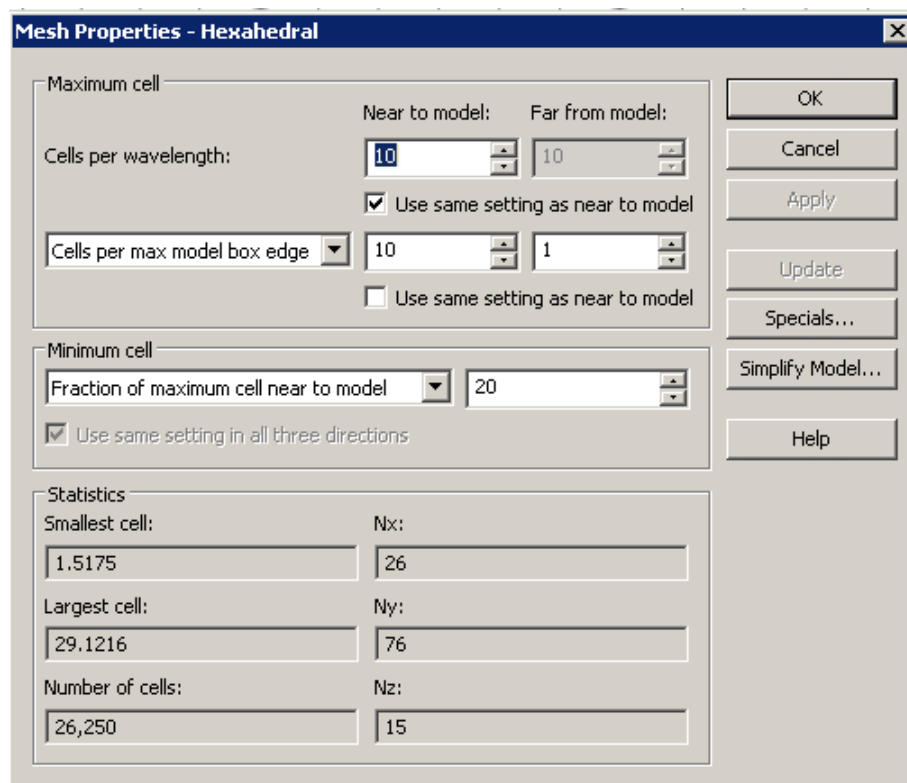
V **Mesh View** můžeme vidět čáry, které jsou tlustší než většina, tyto čáry reprezentují důležité roviny (nazvané snapping planes), na které systém považuje za nezbytné položit mřížkovací čáry. Tyto čáry je možné nastavovat v **Special Mesh Properties** dialogovém okně dostupném z **Mesh: Mesh Control - Global properties - Specials - Snapping**.

Ve většině případů automatický generátor mřížkování vyprodukuje v celku dobré počáteční mřížkování. Ale je doporučeno strávit nějaký čas upravováním nastavení mřížkování.

Nakonec je možno opustit inspekční mod mřížkování pomocí **Mesh: Close - Close Mesh View** nebo stiskem klávesy ESC.

1.6.2 Hexahedralní mřížkování

Dostupné pro TDS. Globální nastavení mřížkování je dostupné v záložce **Simulation: Mesh - Global Settings**, nebo při aktivním **Mesh View - Mesh: Global Settings**

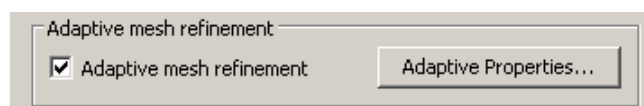


Obrázek 34: Globální nastavení hexahedrálního mřížkování

V závislosti na absolutních a frekvenčních nastaveních je zvolena největší mřížkovací buňka. Je dobré si pohlídat velikost nejmenší buňky, při použití algoritmu v časové oblasti je jeden krok přímo úměrný velikosti této buňky.

Maximální velikost mřížkovací buňky: Jemnost v oblasti, kde se nachází naše struktura je nastavitelná v globálním nastavení mřížkování. Ohraničení struktury definuje oblast jemného mřížkování. Zaškrtnutí možnosti **Use same settings as near model** nám zvýší jemnost mřížkování v oblasti vzdálenější od struktury a zároveň prodlouží čas simulace.

Minimální velikost buňky: Umožňuje použít relativní i absolutní hodnoty.



Obrázek 35: Time Domain Solver - Solver Settings - Adaptivní mřížkování

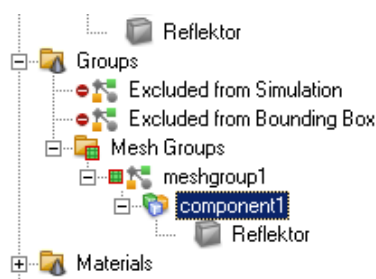
Adaptivní jemnost mřížkování: Tato možnost může být zapnutá v nastavení řešiče (**Home: Setup Solver**) zakliknutím možnosti **Adaptive mesh refinement** - tato nastavení není zapnutá automaticky. Při otevření vlastností adaptivního mřížkování můžeme

nastavit parametry pro ukončení - S-parametr nebo 0D šablony pro výsledky. K dispozici máme dvě strategie pro jemnost: **Expert system based** a **Energy based**.

1.6.3 Lokální mřížkování

Lokální mřížkování může být proveden na jednom objektu vytvořením mřížkovací skupiny nebo přiřazením již do existující mřížkovací skupiny.

1. V navigačním stromu vybereme ze složky komponentů objekt, pro který chceme provést lokální mřížkování.
2. Kliknutím pravým tlačítkem myši otevřeme nabídku a zvolíme **Local Mesh Properties**
3. Zvolíme **Mesh Group** (skupinu) a potvrdíme.

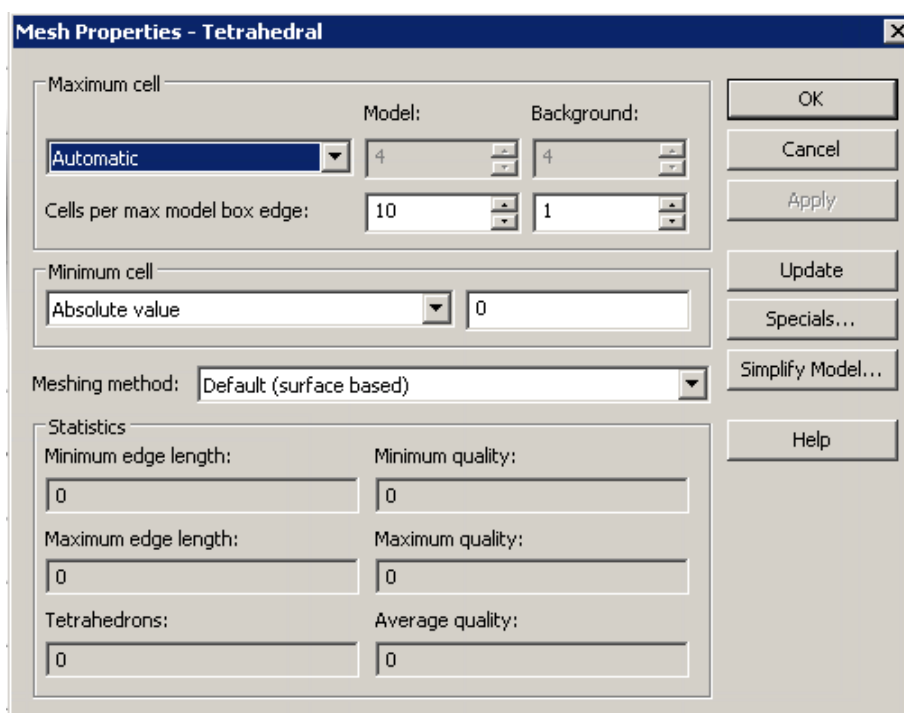


Obrázek 36: Navigační Strom - Mřížkovací skupina

*Pozn. Můžeme zvolit maximální šířku mřížkovacích kroků pro všechny koordinační směry v části **Maximum mesh width settings** v **Local Mesh Properties**.*

1.6.4 Tetrahedrální a povrchové mřížkování

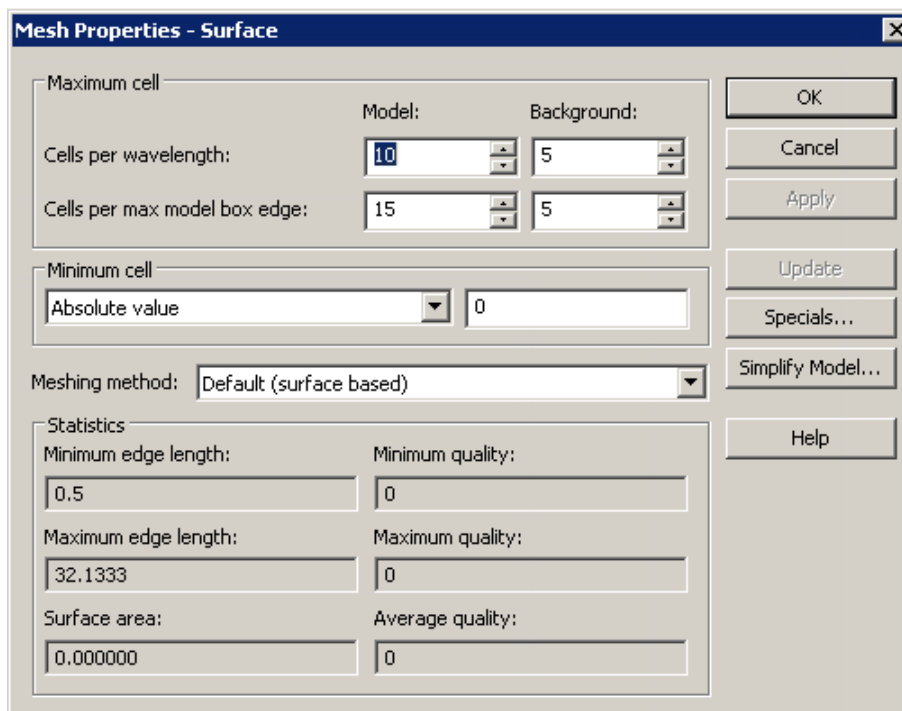
Dostupné pro FS, EIS a EMS. Globální nastavení je dostupné stejně jako u hexahedrálního mřížkování.



Obrázek 37: Globální nastavení tetrahedrálního mřížkování

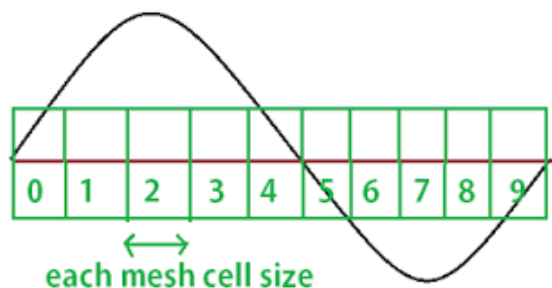
Mesh Properties - Tetrahedral: Cells per wavelengs: Tato hodnota odkazuje na nejvyšší frekvenci simulace. Definuje minimální počet mřížkovacích buněk, které jsou použity pro vzdálenost odpovídající této vlnové délce. **Automatic:** V tomto nastavení bude velikost buňky vybrána automaticky podle vybraného řešiče a jeho nastavení. **Cells per max model box edge:** Maximální velikost buňky je spočítána dělením největší hrany ohraničení modelu a zadaného čísla. Adaptivní mřížkování je automaticky zapnuto.

Surface (povrchové) mřížkování je k dispozici pro IES. Podporuje ohnuté elementy pro lepší číselnou reprezentaci povrchu.



Obrázek 38: Globální nastavení tetrahedrálního mřížkování

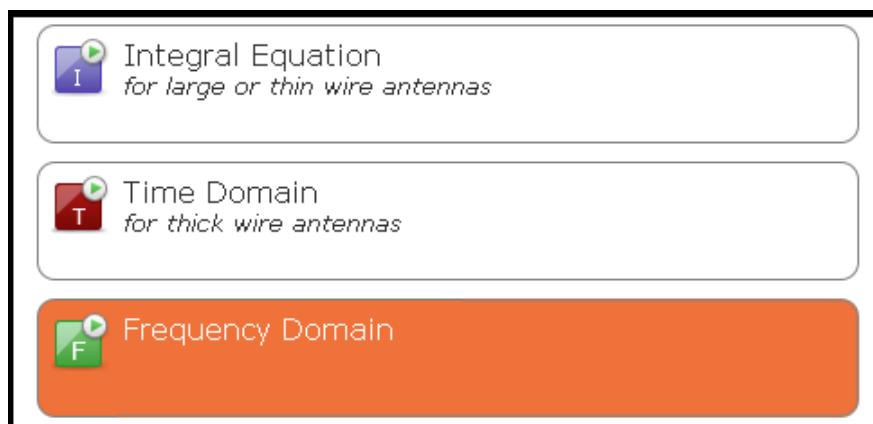
Pro zajištění dobré kvality mřížkování a jeho chování pro všechny frekvence, nejkratší vlnová délka musí být vzorkována v poměru alespoň 10 buněk na jednu vlnu.



Obrázek 39: Počet mřížkovacích buněk vůči vlnové délce. [2]

1.7 Výběr a nastavení řešiče

Pro práci v MWS studiu v oblasti antén máme již do předu doporučeno si vybrat některý z těchto řešičů: Řešič integrálních rovnic (IES), časový řešič (TSD) a frekvenční řešič (FS).



Obrázek 40: Doporučené řešiče pro práci v oblasti antén

V následující tabulce je seznam typických využití a řešičů které jsou k nim nejčastěji využívány. Vzhledem k velkému spektru využití pouze několik nejčastějších oblastí je vypsáno v tabulce. Také v závislosti na jednotlivých strukturách může být lepší využít jiné typy řešičů pro rychlejší zpracování výsledků.

Monopólové, dipólové a multipólové antény	Přechodový
Patch antény	Přechodový, Frekvenční
Konformní antény	Přechodový, Frekvenční
Spirálové antény	Přechodový, Integrálních rovnic
Anténní soustavy	Přechodový
Umístění antén	Přechodový, Integrálních rovnic
Umístění antén (Elektricky náročné)	Přechodový, Integrálních rovnic
Elektricky náročné antény	Přechodový, Integrálních rovnic

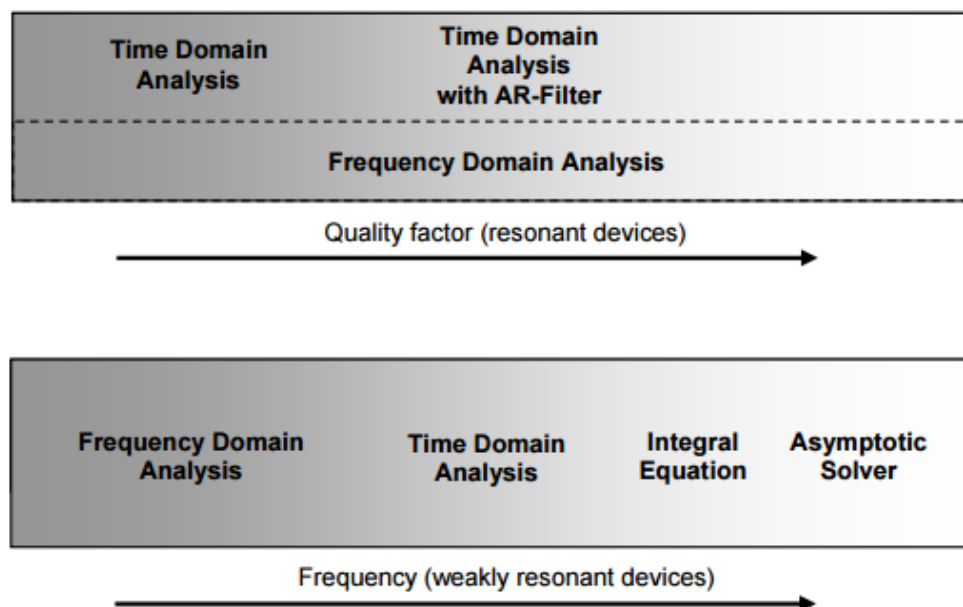
Tabulka 1: Tabulka doporučených řešičů

Výkon přechodového řešiče může klesat pro silně rezonující struktury nebo pokud zařízení funguje na velice nízkých frekvencích. V těchto případech je lepší využít FS. Nicméně simulační čas FS se zvyšuje rychleji než u přechodového řešiče při zvyšujícím se počtu mřížkovacích buněk.

1. Struktury obsahující nelineární materiály nebo diody: FS neumí pracovat s nelinearitami. V těchto případech musí být použit přechodový řešič.
2. Velice náročné struktury nebo vysoké frekvence: V případech, že počet čtyřstěnných mřížkovacích buněk je pro FS v řádech miliónu, měl by být použit TDS nebo IES. Pro elektricky náročné problémy, využití IES nebo Asymptotického řešiče je nejlepší řešení.
3. Periodické struktury s nenulovým posunem fáze: přechodový řešič řeší pouze struktury s nulovým posunem fáze, proto se musí využít FS.

4. Planární struktury: Planární struktury jako například tištěné obvody mohou být řešeny pomocí 3D řešiče s obecným účelem jako například TDS nebo FS. Nicméně pro plné využití planárních vlastností může být použit i vícevrstvý řešič.

Shrnutím těchto informací můžeme vytvořit následující vodítko.

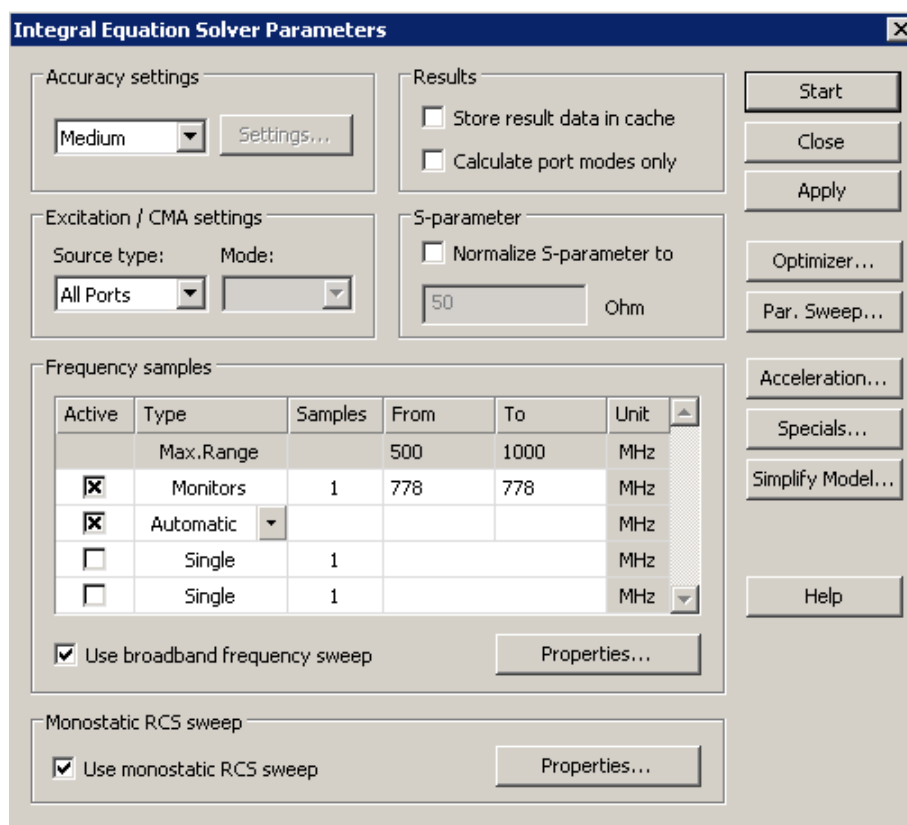


Obrázek 41: Hrubé vodítko pro oblasti využití metod.

Řešiče mohou být kombinovány pro poskytnutí hybridních řešení těžce zařaditelných struktur a systémů

1.7.1 Integral Equation Solver

Využívá povrchové (surface) mřížkování. Model nastavení je velice podobný nastavení FS. Dialogové okno řešiče můžeme otevřít ze záložky **Home: Simulation - Setup Solver - IES**.



Obrázek 42: Integral Equation Solver Parameters.

Speciální širokopásmová frekvenční sweep technika může být využita pro odvození celého širokopásmového spektra z poměrně nízkého počtu frekvenčních vzorků. Pro využití této techniky je důležité zaškrtnout typ **Automatic** v tabulce **Frequency samples** a zaškrtnutí možnosti **Use broadband frequency sweep**.

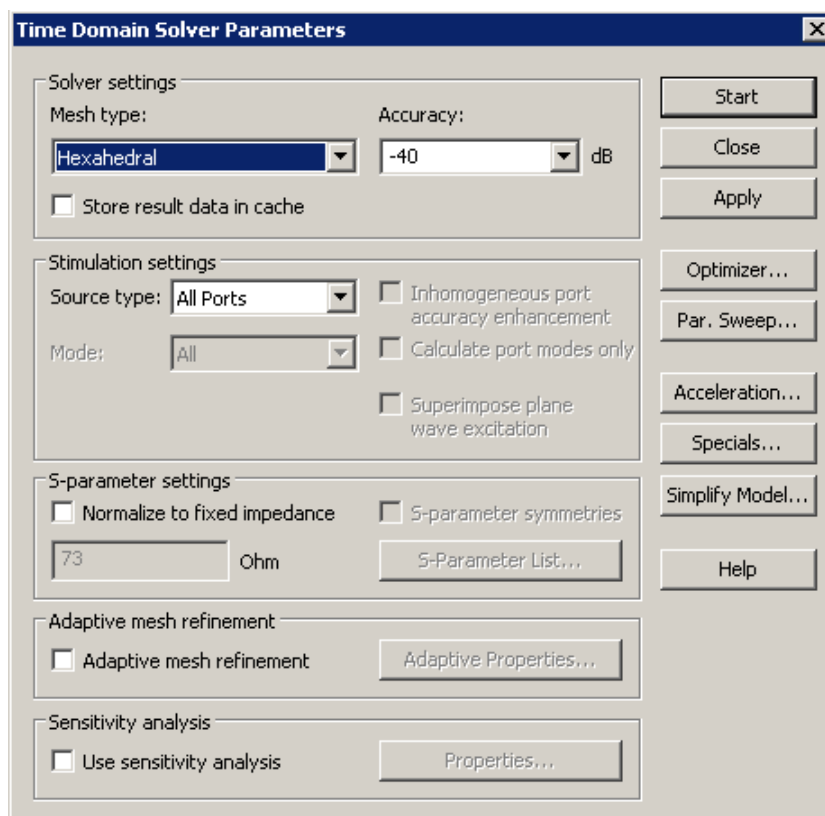
Pro uložení polí určitých frekvencí, musí být monitory dopředu nadefinovány. Poté, co jsou v tabulce zaškrtnuty jsou jejich frekvence přidány na seznam.

Přesnost (Accuracy settings) řešiče může být vybrána z přednastavených možností Nízká (Low), Střední (medium) a Vysoká (high).

Speciální nastavení může být zobrazeno po kliknutí na tlačítko **Speials**. Máme možnost povolit uzemněný nebo nekonečný PEC nebo uzemněný PMC. Pro porovnávání dat s jiným řešičem může být dobré zaškrtnutí **Constant fit and dispersion fit as in Time Domain**, díky čemuž IES použije stejná data materiálu.

1.7.2 Časový řešič

MWS nabízí dva časové řešiče, oba pracující s hexahedrálním (šestistěnným) mřížkováním. Přechodový řešič založený na metodě FIT a TLM řešič založený na metodě TLM. Oba dva mohou být spuštěny přes záložku **Simulation: Solver - Setup Solver - Time Domain Solver** a mohou být odlišeny ve výběru **Mesh type** výběrem **Hexahedral** pro přechodový řešič nebo **Hexahedral TLM** pro TLM řešič.

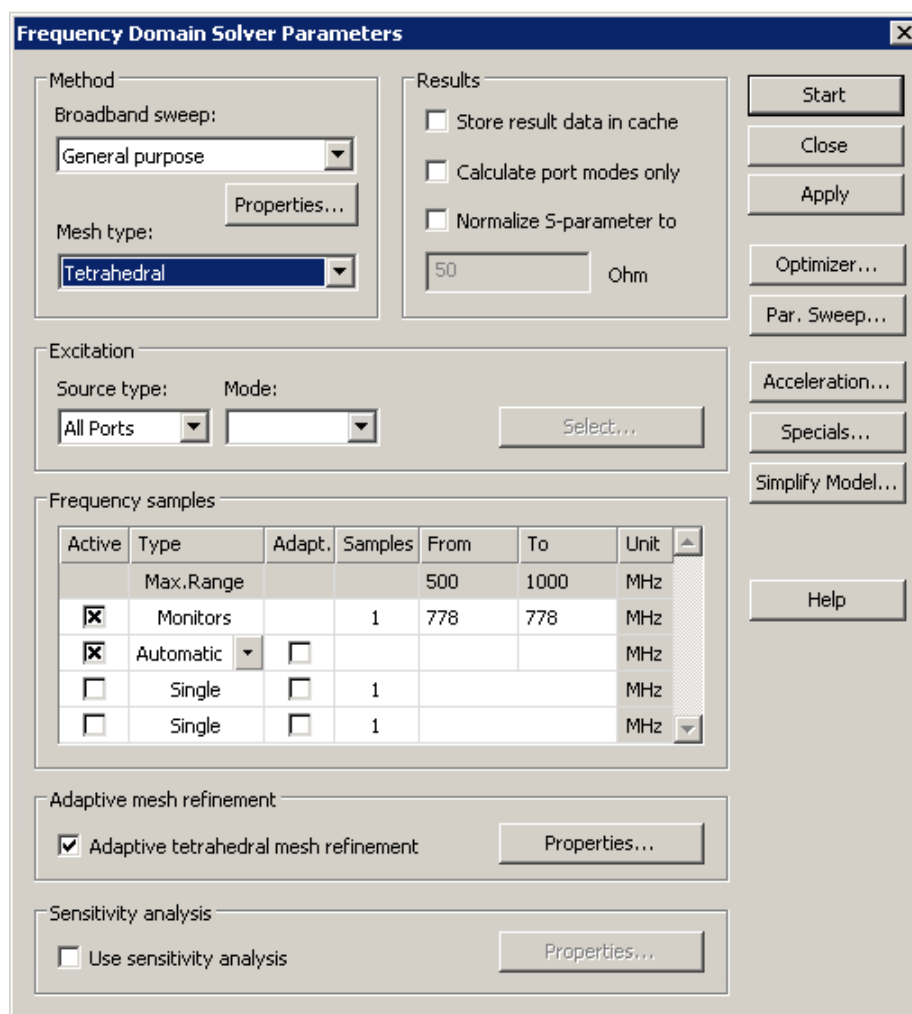


Obrázek 43: Time Domain Solver Parameters.

Výběrem **Source** můžeme specifikovat, který sloupec S-matice má být vypočítán. Pokud výpočet celé matice je požadován, zvolíme **All Ports**. Poměr mezi maximální energií uvnitř struktury v libovolném čase a limit, kdy bude simulace zastavena je specifikován v poli **Accuracy field**.

1.7.3 Frequency Domain Solver

FS může být vybrán v záložce **Home: Simulation - Setup Solver - Frequency Domain Solver**.



Obrázek 44: Frequency Domain Solver Parameters.

Speciální vlastnost FS je možnost využití jak hexahedrálního, tak i tetrahedrálního mřížkování. Ve většině případů porovnáme výsledky tetrahedrálního FS a hexahedrálního přechodového řešiče vzhledem k tomu, že máme možnost využít dvě zcela nezávislé simulační techniky.

Okno **Method** v nastavení nám dovoluje vybrat typ mřížkování a techniku pro celé frekvenční spektrum. FS s **General purpose** nastavením **Frequency sweep** může být viděn jako opak přechodového řešiče. **Fast reduced order model sweep** je alternativa, která efektivně generuje širokopásmové výsledky. **Discrete samples** je možnost pro získání několika specifických výsledků.

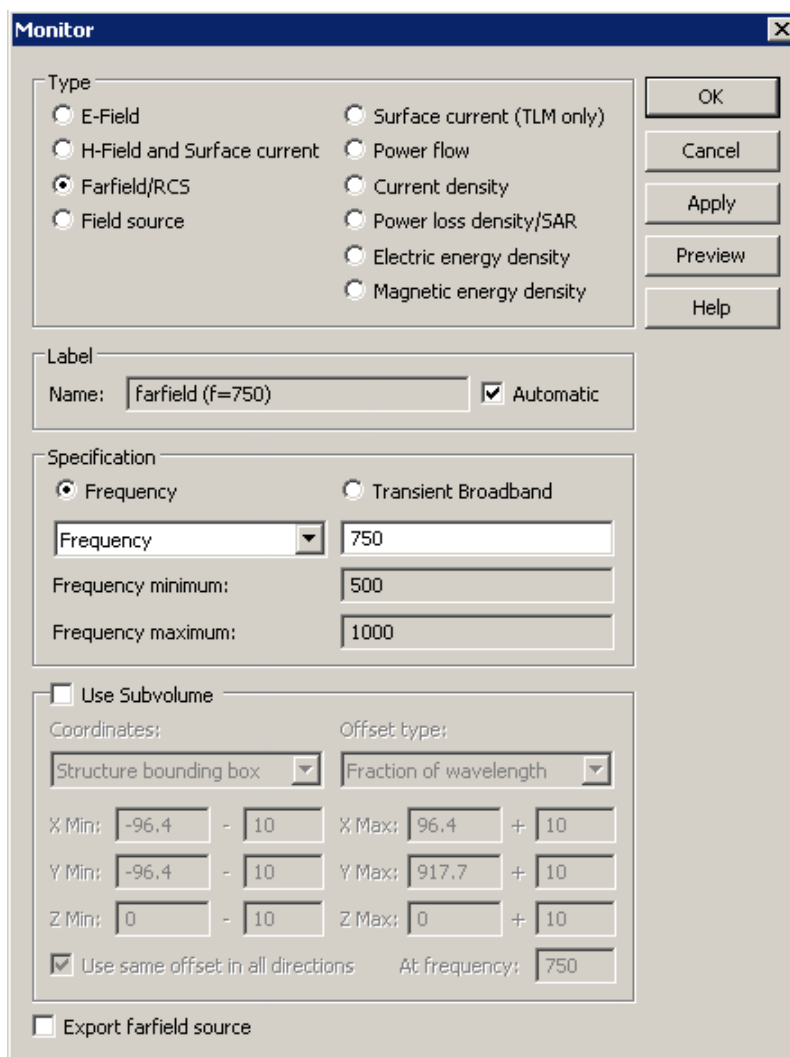
Pro výpočet celé S-matice je již dopředu vybrána možnost **All ports** v nabídce **Source type**. Nabídka mode obsahuje jak **waveguide**, tak **discrete** porty.

Informace ohledně monitorovacích vzorců můžeme nalézt v okně **Frequency samples** v řádku s názvem **Monitors**. Vzorky můžeme odebrat odkliknutím ve sloupci **Active**. Ve výchozím stavu jsou vzorky frekvence přidávány automaticky, dokud S-

parametry v dané frekvenční oblasti nejsou dostatečně přesné.

1.8 Monitory

Monitory jsou užitečné nástroje pro získání mnoha výsledků. Nastavit je můžeme v záložce **Simulation: Monitors - Field Monitors**.

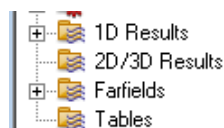


Obrázek 45: Dialogové okno pro nastavení monitorů.

K dispozici máme 10 typů monitorů. Pro simulace antén jsou zejména užitečné monitory Elektrického a magnetického pole (**E-Field** a **H-Field**) a regiony elektromagnetického pole okolo objektu (blízké a vzdálené pole). V okně **Frequency** můžeme nastavit na jakou frekvenci chceme monitor nastavit. Rovněž můžeme monitorovat čas a v případě blízkého a vzdáleného pole širokopásmové přechody. Přehled nastavených monitorů nalezneme v navigačním stromě v záložce **Field** popřípadě **Voltage and Current Monitors**.

1.9 Postprocessing

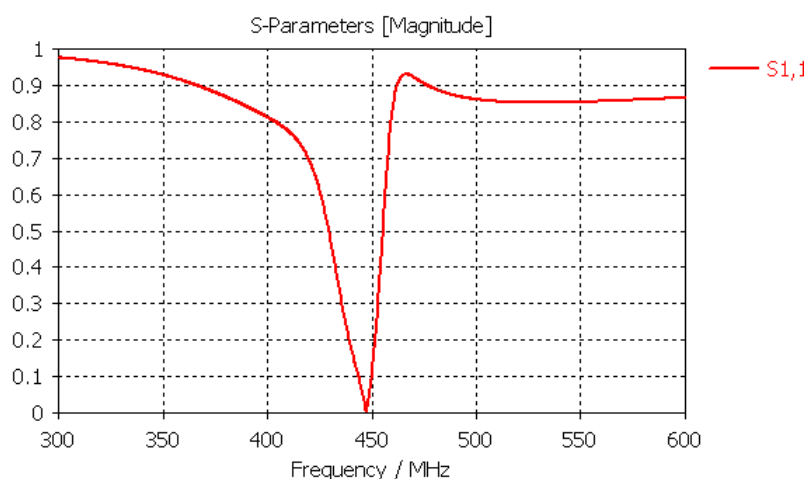
Po ukončení simulace, jsou výsledky obvykle uloženy v navigačním stromu. CSTSS nabízí účinné nástroje pro zpracování výsledků. Například různé možnosti vizualizace výsledků a výpočty sekundárních kvantit. Výsledky simulací jsou ve spodní části navigačního stromu.



Obrázek 46: Navigační strom - výsledky simulací.

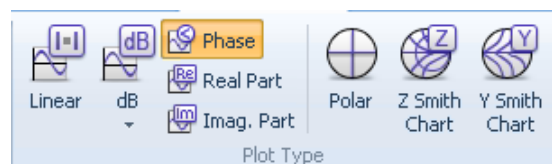
1.9.1 Analýza S-parametru

Výsledky simulace S-parametru můžeme najít v navigačním stromě ve složce **1D Results - S-parameterer**. Při otevření složky **1D** se nám zobrazí nová záložka hlavní liště s názvem **1D plot**, která nám umožňuje měnit vizualizaci získaných výsledků. Můžeme zobrazit výsledky všech simulovaných portů při označení složky **S-parameters**, rovněž je můžeme zobrazit jednotlivě při výběru z této složky.



Obrázek 47: Lineární zobrazení S-parametru.

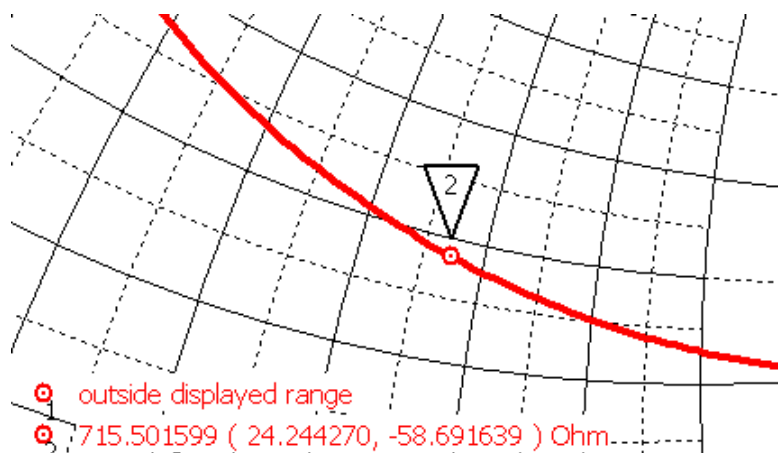
V záložce 1D plot můžeme měnit mezi různými nastavení v záložce **Plot type** nastavení vizualizace, například mezi lineárním rozsahem (na obrázku), logaritmickým měřítkem v dB, dBu, dBm, fází ve stupních nebo za pomoci Z a Y Smithových grafů.



Obrázek 48: 1D Plot type.

V zobrazení výsledků je možné využít všech nástrojů pro zobrazení (přiblížení, rotace, otočení, posunutí). Také může být měněno nastavení os v záložce **1D Plot: Plot Properties - Properties**. Rovněž můžeme záložku osy, která nám ukáže přesnou hodnotu

v daném bodě kliknutím na položku **Axis Marker** v nabídce **Markers**. Záložka může být posouvána jak myší, tak i šipkami na klávesnici. Záložka rovněž může být využita pro zjištění minima a maxima zvolením položky **Markers - Axis Marker - Move marker to minimum/maximum**.

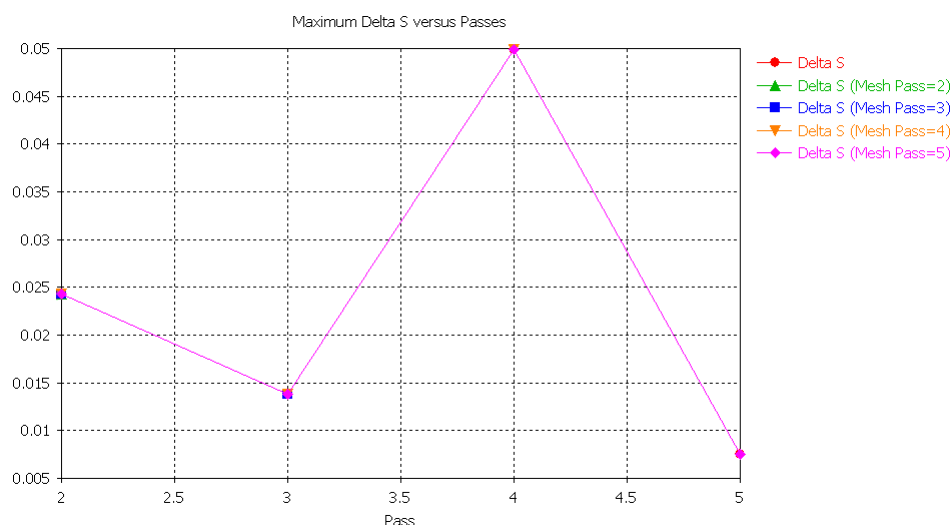


Obrázek 49: Záložka pro křivky na Smithově grafu.

Pro Smithovy grafy jsou k dispozici záložky pro křivky. Mohou být zapnuty v nabídce **Curve Marker - Add Curve Marker** nebo klávesou M. Tyto záložky rovněž mohou být posouvány tažením myši.

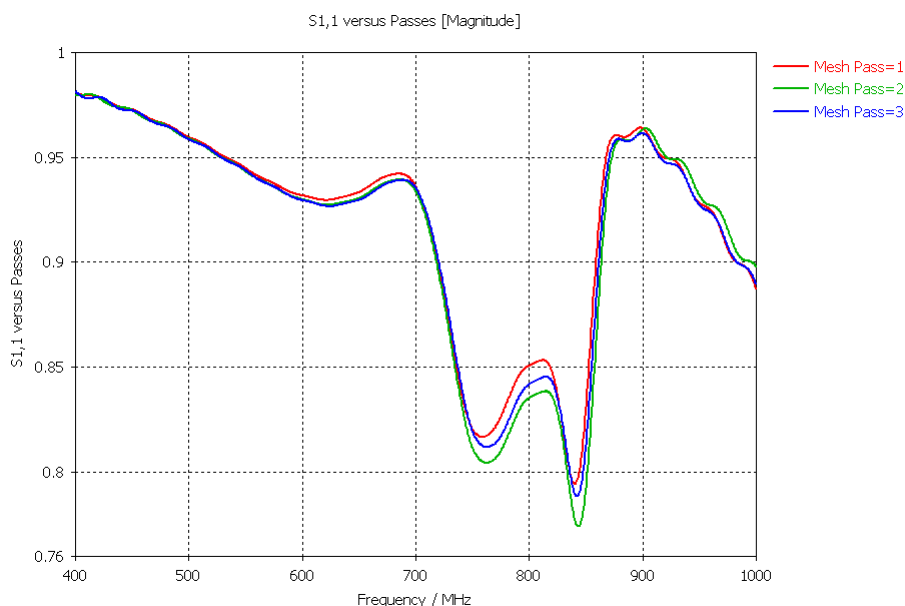
1.9.2 Analýza výsledků, použití Adaptivní jemnosti mřížkování

Nastavení mřížkování ovlivňuje výsledky simulace. Proto když využijeme možnosti Adaptivní jemnosti mřížkování (**Adaptive Mesh Refinement** - Dostupný například v TDS). Zobrazí se nám v navigačním stromě v záložce **1D** složka **Adaptive Meshing** s dalšími výsledky. Tato složka obsahuje výsledky s maximálním rozdílem mezi dvěma výsledky S-parametru. Tato bude zobrazena při výběru z navigačního stromu **1D Results - Adaptive Meshing - Delta S**.



Obrázek 50: Delta S - 5 průchodu mřížkování.

Konvergence výsledků S-parametrů může být zobrazena ve složce **Adaptive Meshing - S-Parameters** a výběrem výsledku.

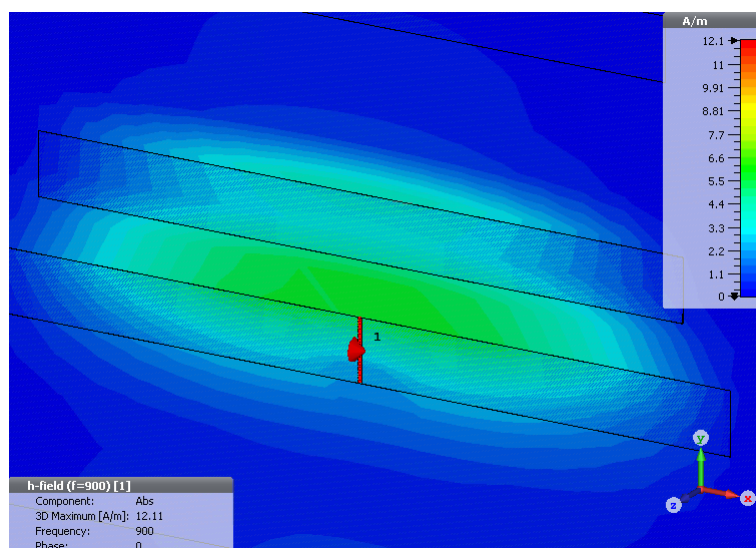


Obrázek 51: S-parameter, 3 průběhy mřížkování.

Můžeme vidět, že konvergence S-parametru ukazuje pouze malé rozdíly ve výsledcích získané použitím dobře generovaného počátečního mřížkování pro konvergenční řešení. V praxi je často moudré využít adaptivní jemnosti mřížkování pro zajištění konvergence výsledků.

1.9.3 2D/3D Analýza

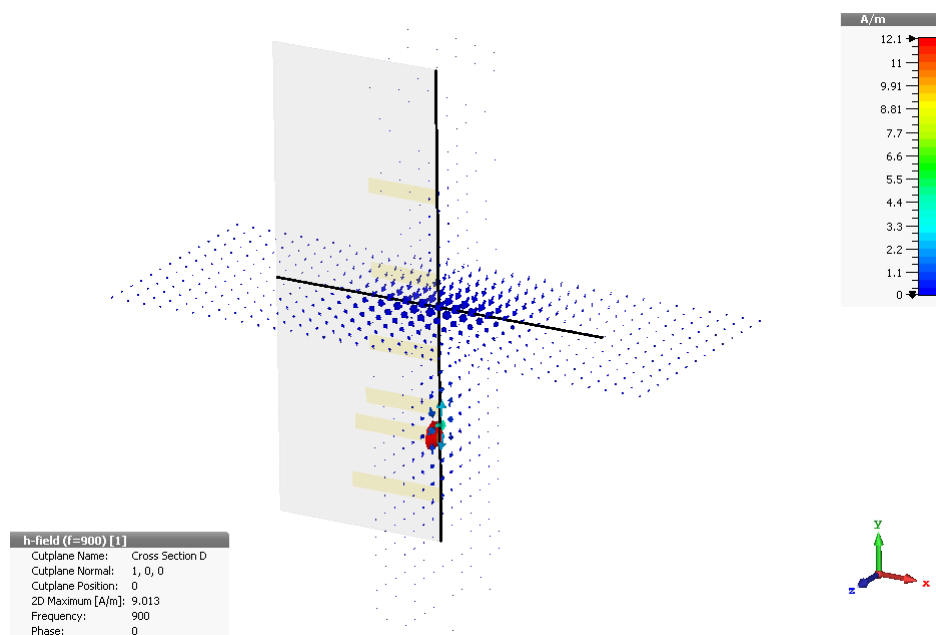
Výsledky monitorů například elektromagnetického pole můžeme nalézt v navigačním stromě - **2D/3D Results - h-field**.



Obrázek 52: Monitor magnetického pole - Abs.

Tyto zobrazení nám dovolí prozkoumat distribuci elektrických či magnetických polí. CSTSS nám nabízí možnost měnit nastavení vizualizace v nově vzniklé záložce **2D/3D Plot: Plot properties - Properties**. Také máme k dispozici animaci pole v nabídce **Plot Properties - Animate Field**. Zde bude fáze pole automaticky posouvána mezi 0 až 360 stupni. Animaci můžeme ukončit pomocí klávesy ESC.

Více detailů o struktuře můžeme získat analýzou průřezů struktury. Takto můžeme provést výběrem elektrického nebo magnetického pole a výběrem ze záložky **2D/3D Plot: Sectional View - 3D Fields on 2D Plane**.

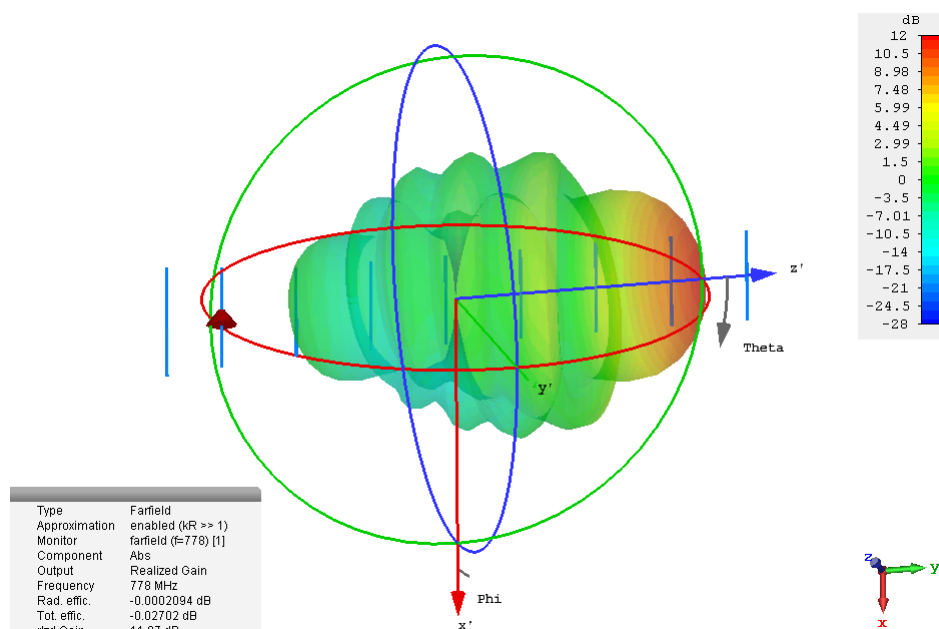


Obrázek 53: Monitor magnetického pole.

Vzhledem k tomu, že data jsou získány z 3D, můžeme volit pozici roviny, ve které chceme pole zobrazit. Toto je možné z nabídky **Sectional View: Cutting Plane normal and position** nebo pomocí šipek.

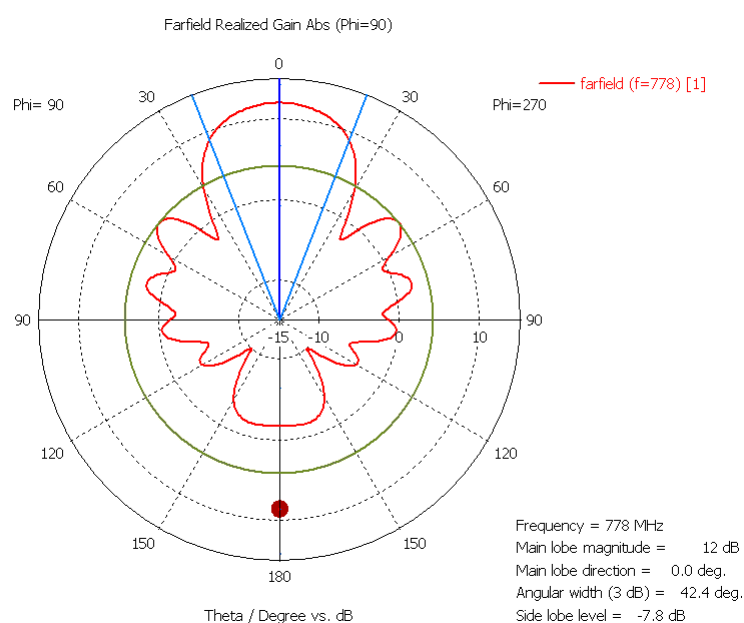
1.9.4 Analýza vzdáleného pole

Pro návrh antén jsou vyzářovací diagramy velice důležité, po nastavení monitoru vzdáleného pole a provedení simulace výsledky můžeme nalézt v navigačním stromu ve složce **Far-field**.



Obrázek 54: 3D Farfield, izotropní polarizace.

Po otevření monitoru vzdáleného pole se nám zobrazí nová záložka s názvem **Farfield Plot**. V ní můžeme v nabídce polarizace vybírat ze 4 typů: **Isotropic**, **Linear omnidirectional**, **Linear directional** a **Circular directional**. Směrové vlastnosti antény pak můžeme zobrazit v nabídce **Plot type** jako Polární, Kartézské, 2D a 3D.



Obrázek 55: Polární zobrazení, izotropní polarizace.

1.9.5 Šablony pro postprocessing

Postprocessing Templates neboli šablony pro zpracování výsledku (dále jen šablony) dovolují flexibilní zpracování 2D/3D polí, 1D signálů nebo skalárních hodnot. Tyto šablony jsou vyhodnoceny po každém výpočtu během sweepu parametrů a optimalizací. Data jsou ukládána do tabulek pro jednoduchý přístup.

Typické příklady šablon pro 1D výsledky jsou například:

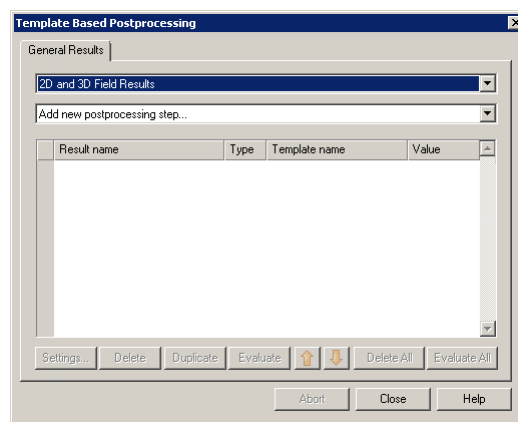
- Z,Y oproti frekvenci
- Širokopásmové hodnoty vzdáleného pole
- Časy skupinového zpoždění
- 1D grafy 2D/3D výsledku společně s arbitrárními křivkami
- FFT existujících časových signálů
- Kombinace 1D výsledků za použití analytické formule

a další. Nebo 0D výsledky (jednotlivé reálné skalární hodnoty):

- Minimální, maximální, integrální a další hodnoty existujících 1D výsledků
- Hodnota Q, energie, ztráty
- Křivka-, Stěna-, nebo objemové integrály 2D/3D výsledků
- Kombinace těchto 1D výsledků za použití analytické formule.

a další..

Šablony můžeme využít ze záložky **Post Processing: Result Templates - Template Based Post Processing** nebo zkratkou Shift + P.



Obrázek 56: Template Based Postprocessing.

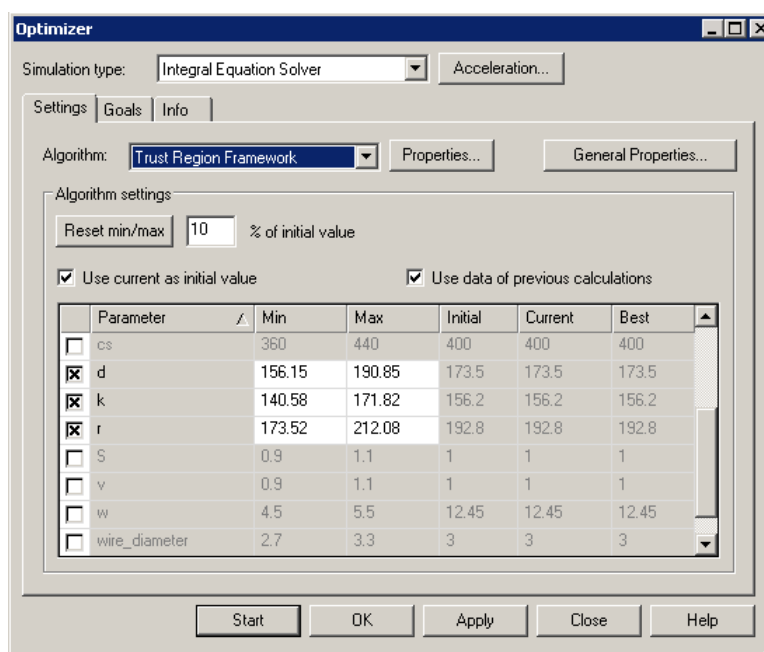
Seznam obsahuje definované sekvence úloh. Novou můžeme přidat výběrem skupiny šablon a následným výběrem položky z vysunovacího seznamu. Pole **Type** indikuje, jestli

je úloha 1D křivka nebo 0D. Pokud právě zvolená úloha nám nabízí dialogové okno s nastavením, pak po kliknutí na tlačítko **Settings** můžeme měnit parametry šablony.

Tlačítko **Evaluate** spustí označenou úlohu, **Evaluate All** spustí všechny úlohy v seznamu. Rovněž při každém spuštění řešiče jsou všechny šablony znovu zpracovány, včetně optimalizace a sweepu parametrů. Provedení je postupně dle pořadí v seznamu. Výsledky šablon můžeme nalézt v navigačním stromu ve složce **Tables**.

1.10 Optimalizace

MWS nabízí účinný vestavěný optimalizátor pro optimalizaci parametrů. Pro použití optimalizace musíte mít zadány parametry struktury v seznamu parametrů. Spuštění optimalizace můžeme ze záložky **Simulation: Solver - Optimizer**.



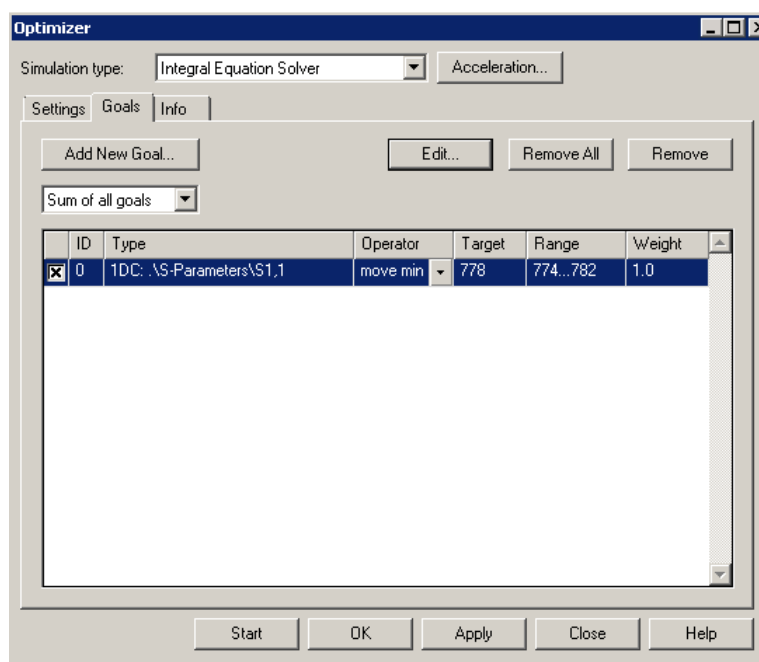
Obrázek 57: Dialogové okno Optimizeru - Settings.

Algoritmy optimalizace:

1. **Trust Region Framework:** Rychlá a přesná optimalizace s robustní konvergencí, která nalezne optimální parametr z daného rozsahu za použití malého počtu vyhodnocení.
2. **Nelder Mead Simplex Method:** Optimalizátor pro více komplexnější případy s dobrou konvergencí. Využívá poměrně malý počet vyhodnocení pokud má problém malý počet parametrů (méně než 5).
3. **CMA* Evolution Strategy:** Globální optimalizátor s dobrou konvergencí. Stochastický vyhledávač s biologii inspirovaným procesem výběru který je adaptován pro složité optimalizační problémy.

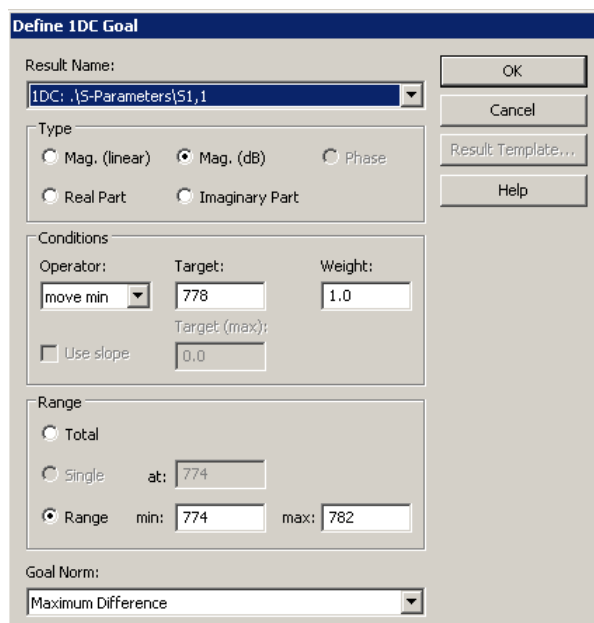
Checkboxem vybereme parametry, které chceme použít pro optimalizaci. V oknech **min/max** můžeme nastavit maximální a minimální hodnoty parametru při optimalizaci.

Dalším krokem je nastavení cíle v záložce **Goals**.



Obrázek 58: Dialogové okno Optimizeru - Goals.

Cíle jsou založeny buď na předchozích výpočtech výsledků, nebo na definovaných šablonách pro výsledky. V tomto případě je cíl přesunout minimum S-parametru S1.1 na požadovanou frekvenci. Kliknutím na **Add New Goal** zobrazíme dialogové okno pro definování cíle optimalizátoru.



Obrázek 59: Definování cíle optimalizátoru.

V okně **Conditions Frame** máme na výběr z operátorů $<$, $>$, $=$ a **move min/max**. **Min** a **max** operátory existují pro výsledky S-parametru. Pokud si přejeme aby data nepřekročila danou hodnotu zvolíme operátor $<$, v opačném případě $>$ a pro optimalizaci

parametrů na stejnou hodnotu použijeme `=`. Pro posunutí minimálních nebo maximálních hodnot na specifickou úsečkovou hodnotu využijeme operátor **move min/max**.. Do okna **Target** definujeme požadovanou frekvenci a pomocí **Weight** můžeme nastavit prioritu vůči ostatním cílům.

Pokud v datech S-parametru máme více než jedno minimum, můžeme v okně Range limitovat rozpětí frekvence, ve kterém se bude minimum hledat. Po kliknutí **Ok** se nám nový cíl zobrazí v seznamu. Optimalizaci spustíme kliknutím na tlačítko **Start**.

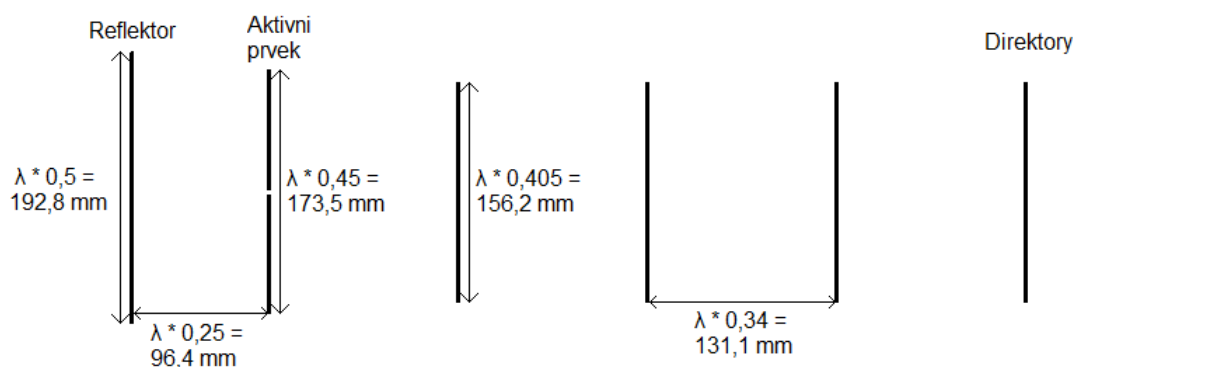
2 Vytvoření a simulace vlastního modelu antény

Navrhovaná anténa bude devítiprvková Yagi-Uda pro frekvenci 778 MHz. Její konstrukce bude z měděného vodiče.

2.1 Návrh antény

Na začátku si musíme vypočítat rozměry dipólů, reflektoru a sedmi direktorů. K tomu využijeme návod [3, Konstrukce Yaggiho antény]. Začít musíme výpočtem vlnové délky λ . Činitel krácení $k = 1$.

1. Vlnová délka $\lambda = 385,604113 \text{ mm}$
2. Délka reflektoru $\lambda * 0,5 = 192,8 \text{ mm}$
3. Délka dipólu $\lambda * 0,45 = 173,5 \text{ mm}$
4. Délka direktoru $\lambda * 0,405 = 156,2 \text{ mm}$
5. Rozestup mezi aktivním prvkem a reflektorem $\lambda * 0,25 = 96,4 \text{ mm}$
6. Rozestupy mezi aktivním prvkem a direktory $\lambda * 0,34 = 131,1 \text{ mm}$



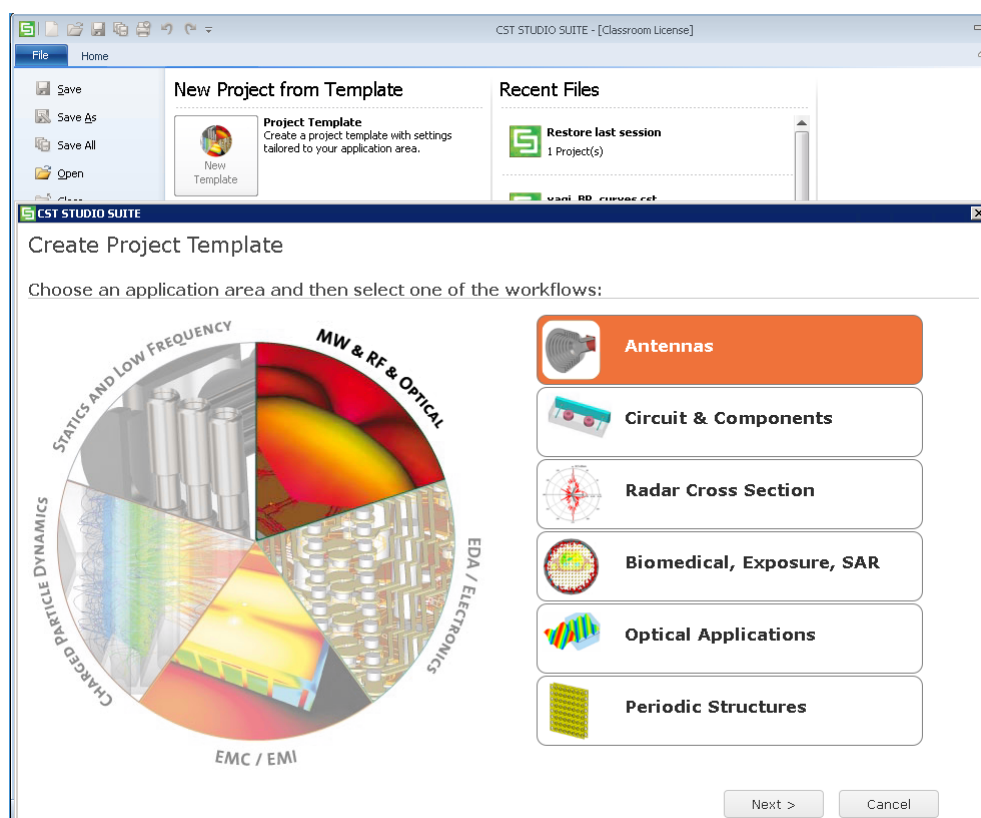
Obrázek 60: Návrh Yagi-Uda antény.

2.2 Vytvoření modelu antény

Nyní, když už máme připravený návrh antény a víme že její konstrukce bude z měděného vodiče tak můžeme začít s prací v CSTSS.

2.2.1 Nový projekt

Po spuštění software CST Studio Suite se nám zobrazí záložka **New and Recent**.



Obrázek 61: Výběr nového projektu.

V ní klikneme na možnost **Project Template** která nám otevře nabídku pro výběr oblasti našeho působení. Vybereme **MW and RF and Optical** a následně **Antennas**. Tímto se dostáváme k vytvoření nové šablony projektu. Nastavení které provedeme můžeme později změnit.

1. Please select a workflow: Wire

Jak již bylo řečeno konstrukce antény bude z vodiče, proto volíme položku wire.

2. The recommended solvers for the selected workflow are: Integral Equation

Na výběr dostaneme IES a řešiče s obecným zaměřením TDS a FS. Anténu budeme konstruovat pomocí křivek a použití povrchového mřížkování které nám nabízí IES bude mnohem výhodnější než výběr TDS nebo FS.

3. Please select units:

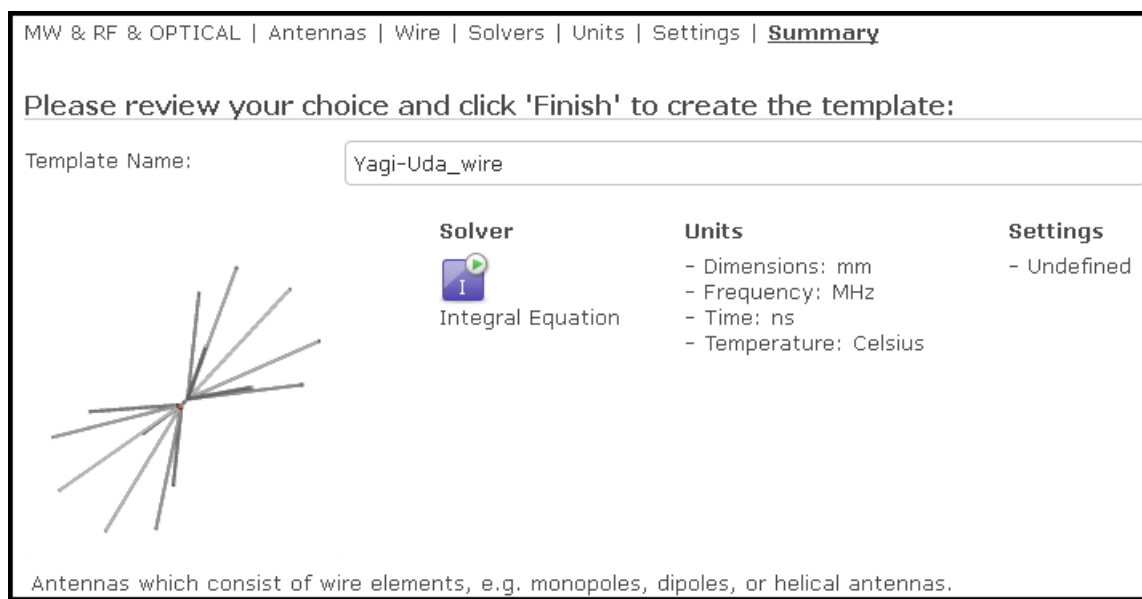
Tuto část můžeme ponechat v základním nastavení. Dimenze je nastavená jak potřebujeme v mm a frekvence v MHz.

4. Settings

Víme že naše anténa je pro frekvenci 778 MHz. Proto můžeme nastavit dolní hranici na 500 MHz a horní na 1000 MHz. Rovněž máme již možnost přednastavit monitory. Nicméně prozatím necháme prázdné. Monitory nastavíme později.

5. Summary

V posledním kroku vidíme shrnutí našeho nastavení. Můžeme rovněž pojmenovat naší novou šablonu projektu.



Obrázek 62: Shrnutí nastavení šablony projektu.

Kliknutím na tlačítko **Finish** se přesuneme do hlavního okna CST Design Studia.

2.2.2 Vytvoření modelu

Prvním krokem při vytváření nového modelu by měla být parametrizace. Seznam parametrů zadáváme ve spodní části hlavního okna.

Parametrizace: Tabulku vyplníme rozměry pro návrh antény, které jsme si vypočítali na začátku kapitoly.

Parameter List					
	Name	Expression	Value	Description	Type
-	r	= 192.8	192.8	Délka Reflektoru	Length
-	d	= 180.44	180.44	Délka dipolu	Length
-	k	= 156.2	156.2	Délka Direktoru	Length
-	a	= -96.4	-96.4	Rozestup reflektoru od aktivního prvku	Length
-	b	= 131.1	131.1	Rozestup mezi aktivním prvkem a direk...	Length
-	c	= 131.1	131.1	Rozestup mezi direktory	Length
-	wire_diameter	= 3	3	Diametr drátu	Undefined
-	m	= 1	1	Mezera	Undefined

Obrázek 63: Seznam s vyplněnými parametry.

K původně vypočítaným rozměrům nám přibyl "wire diameter" který budeme potřebovat při transformaci křivky na vodič. Jediná změna je parametr a který udává rozestup mezi reflektorem a aktivním prvkem. Hodnota je uvedena v záporu vzhledem k tomu že bude umístěn za aktivním prvkem který je umístěn ve středu osy.

Vytvoření křivek: Nyní se již můžeme přesunout k samotnému modelování antény. Vybereme tedy záložku **Modeling** a následně pracujeme v nabídce **Curves**.

Rozklikneme nabídku **Curver** a vybereme z ní položku **lines**, následně stiskem klávesy ESC otevřeme dialogové okno pro vytvoření křivky.

Obrázek 64: Dialogové okno pro vytvoření křivky - linka.

V okně **Name** vždy vyplníme jméno vytvářeného prvku. Konkrétně prvek dipól se bude skládat ze dvou částí s mezerou uprostřed pro připojení portu. Souřadnicové okna nám umožňují zadat souřadnice kde prvek končí a začíná v osách X a Y.

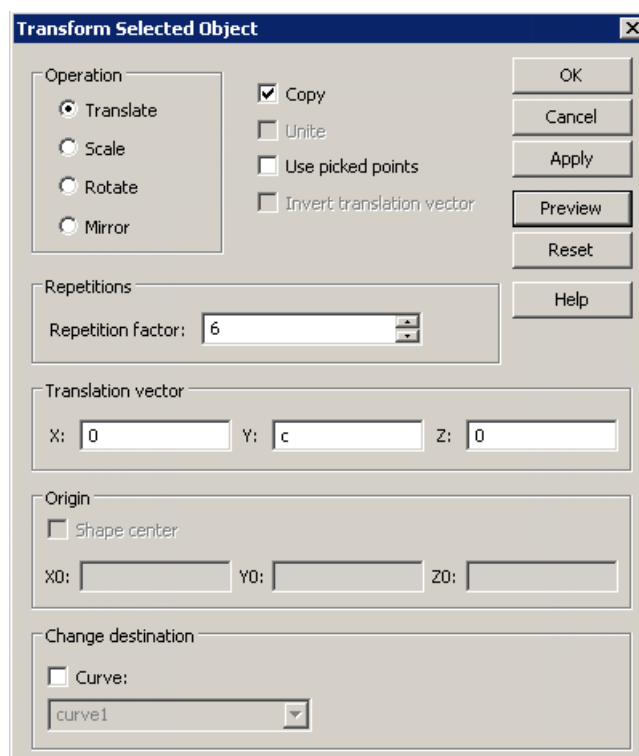
Počátek první poloviny dipólu umístíme na souřadnici X 0,5 aby jsme vynechali místo pro připojení portu. Konec je umístěn na souřadnici kterou získáme vydělením délky dipólu dvěma (protože je rozdělen na dvě části) a posunutím o 0,5 kvůli zachování délky vzhledem k posunutí kvůli portu. Souřadnice Y dipólu necháváme na 0 takže bude umístěn na počátku osy Y. Vytvoření potvrdíme tlačítkem **OK**.

Stejným procesem vytvoříme i druhou polovinu dipólu, reflektor a první direktor.

Tabulka 2: Souřadnice prvků

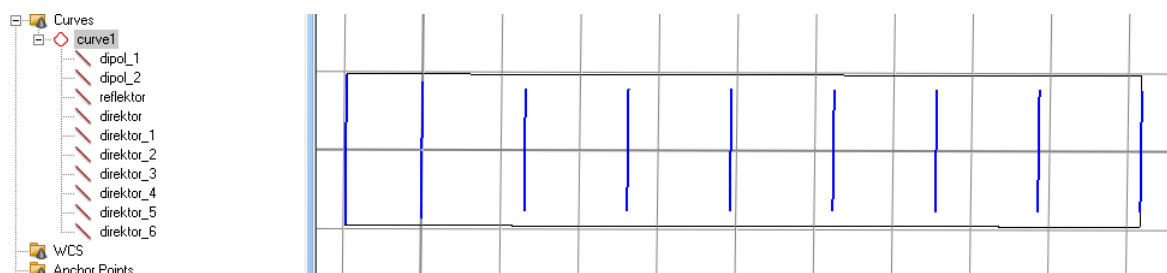
Name	X1	X2	Y1	Y2
Dipol_2	$-((d/2)+0.5)$	-0,5	0.0	0.0
Reflektor	$-(r/2)$	$r/2$	a	a
Direktor	$-k/2$	$k/2$	b	b

Nyní nám zbývá k vytvoření zbývajících 6 direktorů. Vzhledem k tomu že mají stejnou délku a rozestupy, nemusíme je vytvářet manuálně ale můžeme využít kopírování pomocí transformací.



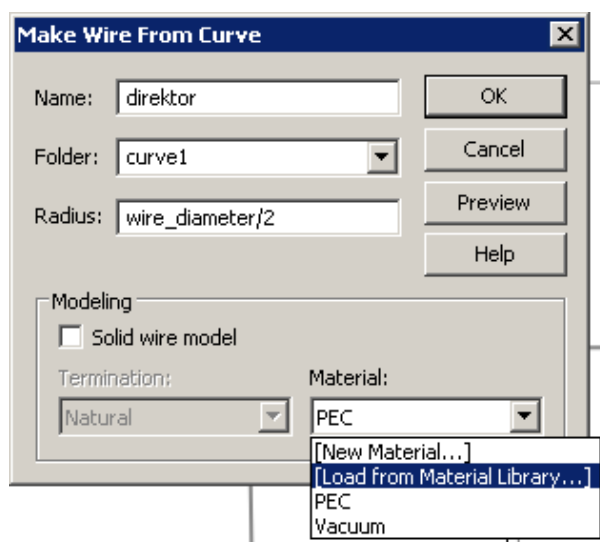
Obrázek 65: Vytvoření kopií direktoru.

V navigačním stromě vybereme ze složky **Curves: Curve1: Direktor** a v záložce **Modeling** zvolíme **Transform: Translate**. Zatrhneme checkbox **Copy** protože chceme vytvořit nové kopie, **Repetition factor** nastavíme na 6, protože chceme vytvořit 6 kopií a v **Translation Vector** nastavíme pro Y souřadnici parametr c, který udává rozestup mezi direktory. Potvrzením vytvoříme 6 nových křivek s posunem na ose Y.



Obrázek 66: Struktura z křivek.

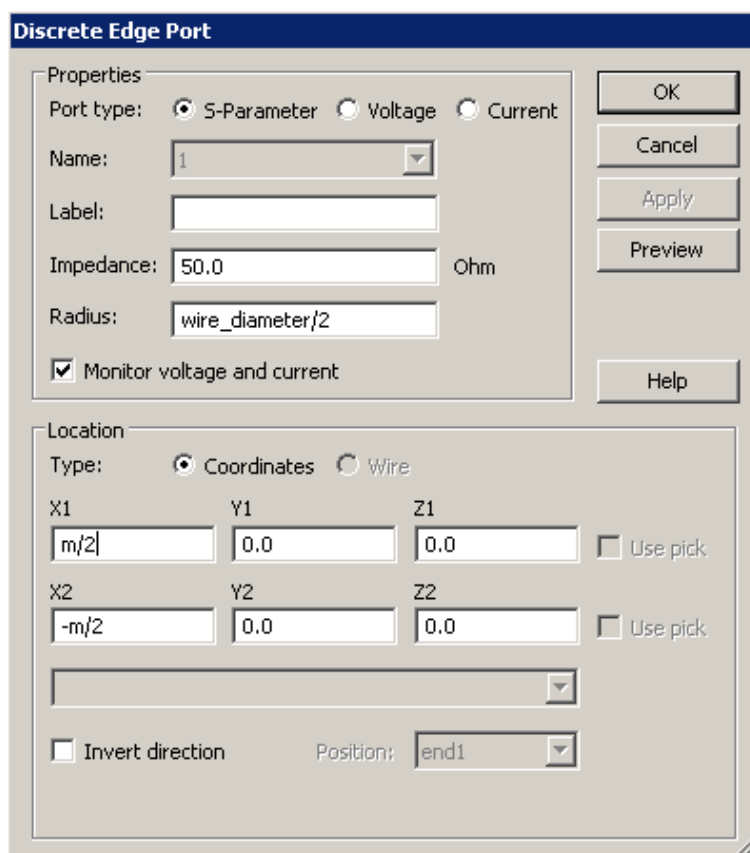
Převedení křivek na měděný vodič Následujícím krokem je převést naši strukturu vytvořenou z křivek na vodič. Toto provedeme v záložce **Modeling: Shapes - Wire from Curve**. Po zvolení této možnosti vybereme v hlavním okně křivku, kliknutím jí označíme a klávesou ENTER otevřeme dialogové okno.



Obrázek 67: Vodič z křivky.

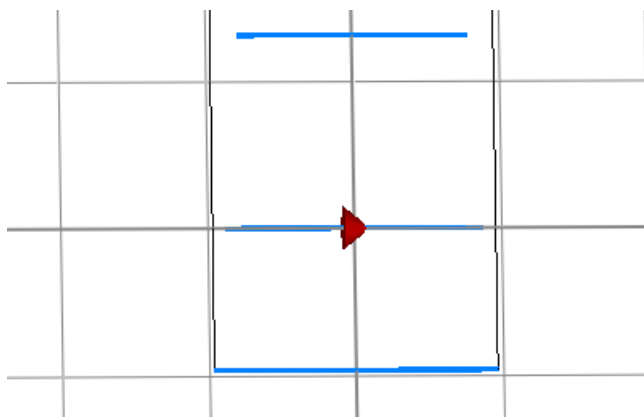
Vyplníme položku **Name** dle prvku který měníme a jako radius zvolíme parametr wire diameter/2. Také již rovnou můžeme přiřadit materiál. Při prvním přiřazení jej musíme načíst z knihovny materiálů zvolením položky **Load from Material Library**. Tímto se nám otevře knihovna materiálů. Můžeme využít filtr pro vyhledání materiálu **Copper** nebo jej nalezneme v tabulce manuálně. Zvolíme tedy položku **Copper (annealed)** a klikneme na tlačítko **Load**, poté jej můžeme zvolit v nabídce **Material**. Tímto procesem vytvoříme vodiče ze všech křivek tvořící naši anténu.

Vytvoření portu: Posledním krokem vytvoření našeho modelu je přidání portu. Toto provedeme v záložce **Simulation: Sources and Loads**. Z nabídky vybereme **Discrete Port** a následně se nám otevře dialogové okno.



Obrázek 68: Discrete edge port - Dialogové okno.

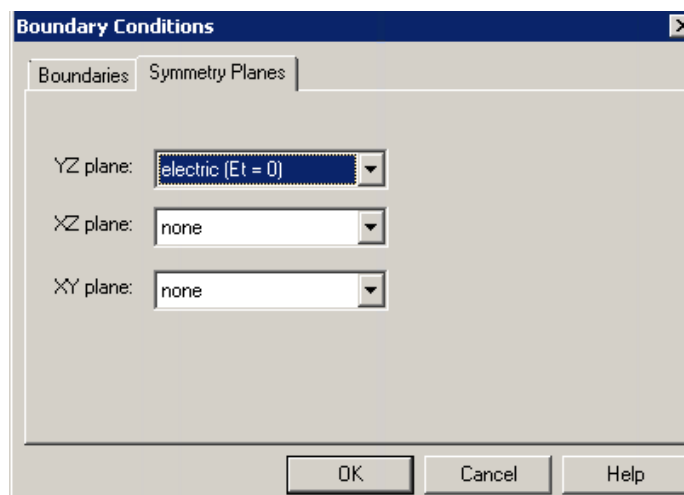
Typ portu ponecháme **S-parameter**. Rádus zvolíme totožný jako jsme zadávali u vodiče: "wire diameter/2". Ponecháme monitorování napětí a proudu. Pozici portu zadáme pomocí souřadnic a to X1 $m/2$ a X2 $-m/2$. Což je mezera kterou jsme ponechali mezi dipóly. Ostatní souřadnice ponecháme na 0 a stiskneme **Ok**.



Obrázek 69: Vytvořený port.

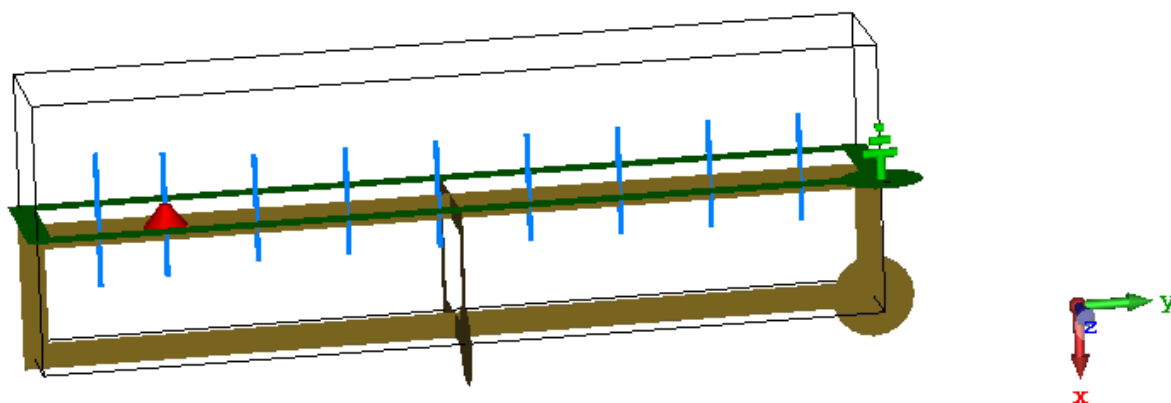
2.3 Podmínky hranic a symetrie

Hranice a symetrii můžeme nastavit ze záložky **Simulation: Settings - Boundaries**. (V případě že se nám nezobrazí ohraničení, musíme prvně nastavit rozpětí frekvence v **Settings - Frequency** na rozsah 500 - 1000 MHz)



Obrázek 70: Nastavení symetrie.

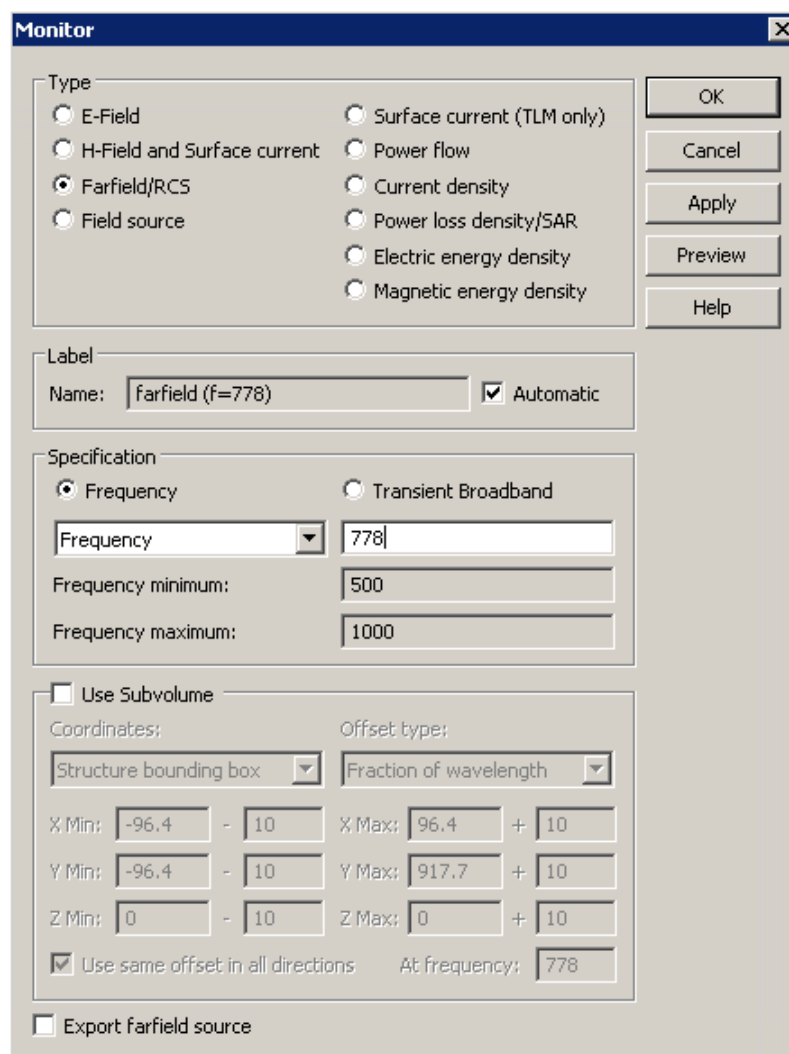
V záložce **Boundaries** nastavíme pro všechny osy možnost **open (add space)** pro zvětšení hranic simulace. V záložce **Symmetry Planes** nastavíme symetrii pro rovinu YZ na hodnotu **electric ($E_t = 0$)**, toto nám značně sníží simulační čas faktorem dvou.



Obrázek 71: Nastavení symetrie pro rovinu YZ.

2.4 Nastavení monitorů

Nastavení monitorů lze provést ze záložky **Simulation: Monitors - Field Monitor**. Toto nám otevře následující dialogové okno:

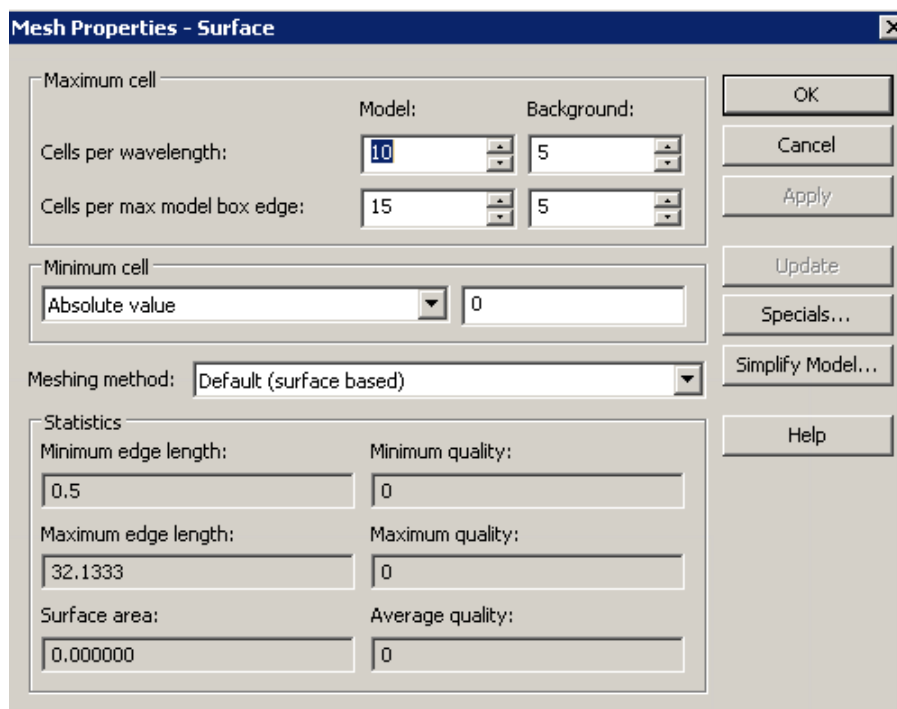


Obrázek 72: Nastavení symetrie pro rovinu YZ.

Nastavíme typ monitoru **Farfield/RCS**. Specifikaci nastavíme pro frekvenci na 778 MHz, tedy frekvenci pro kterou jsme vypočítali rozměry naší antény a potvrdíme pomocí **OK**. Rovněž také můžeme přidat několik dalších monitorů vzdáleného pole pro porovnání totožným způsobem.

2.5 Mřížkování

Před spuštěním simulace také můžeme zkontrolovat a upravit nastavení mřížkování v záložce **Simulation: Mesh - Global properties**.



Obrázek 73: Nastavení mřížkování.

Zde můžeme změnit nastavení počtu buněk pro urychlení simulace. V okně **Maximum Cell** provedeme následující změny:

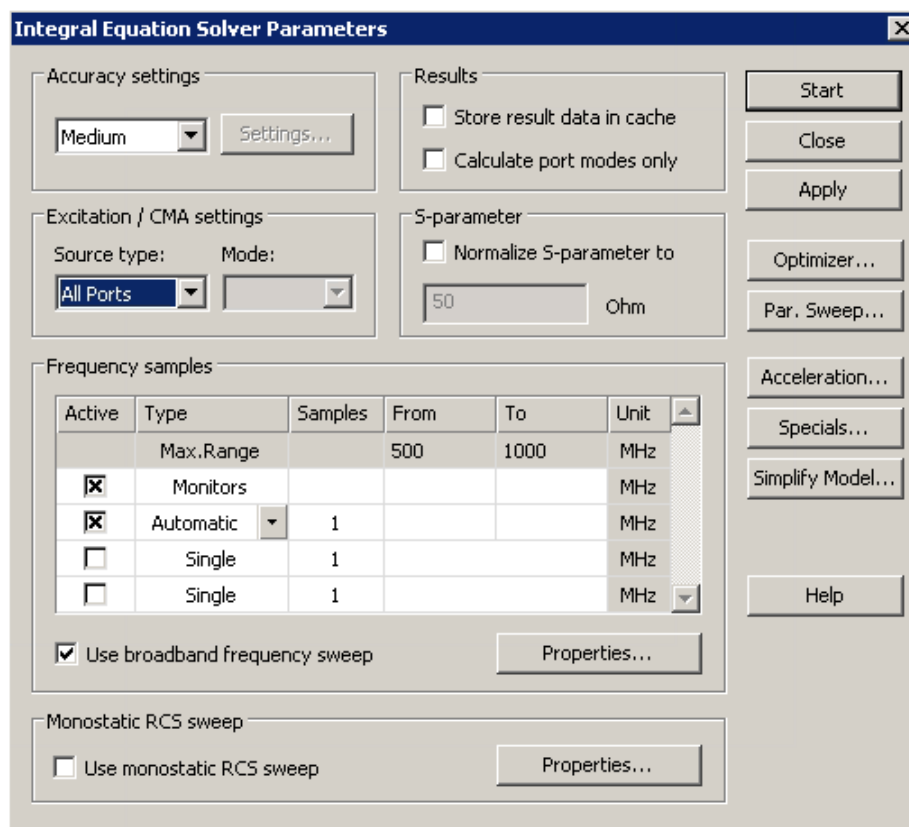
- **Cells per wavelength - Model: 10, Background 5**
- **Cells per max model box edge - Model: 15, Background 5**

Změny potvrdíme pomocí **Ok**.

Pro zajištění dobré kvality mřížkování a jeho chování pro všechny frekvence, nejkratší vlnová délka musí být vzorkována v poměru alespoň 10 buněk na jednu vlnu. Při nastavování počtu mřížkovacích buněk bereme v potaz vlnovou délku a rozměry našeho modelu.

2.6 Nastavení řešiče a spuštění simulace

Posledním krokem před spuštěním simulace je výběr a nastavení řešiče. Toto je možné ze záložky **Simulation: Solver - Setup Solver**. Již předem jsme si vybrali IES, vzhledem k tomu že je nejlepší volba pro naši anténu tvořenou vodičem.

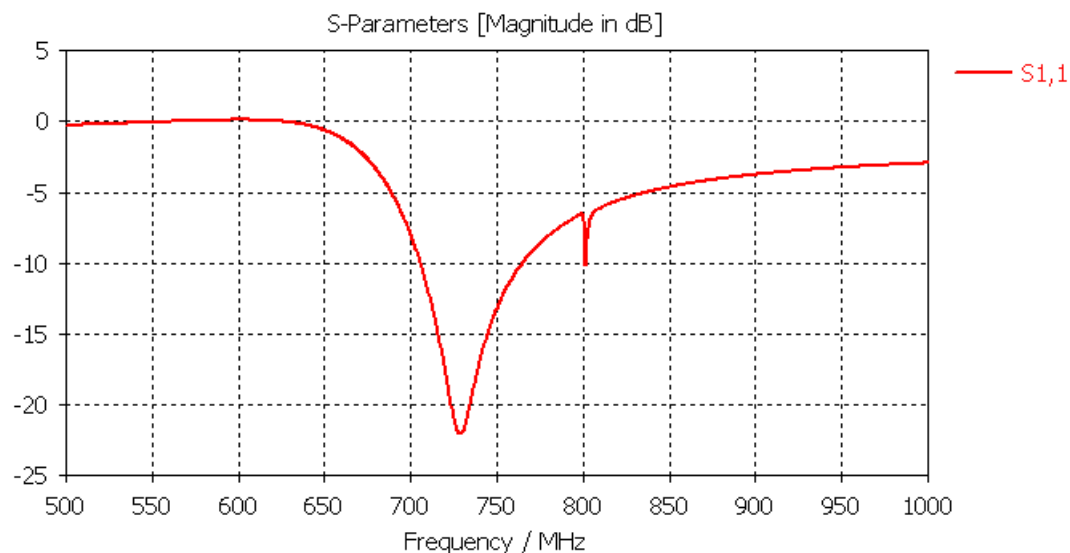


Obrázek 74: Nastavení řešiče - IES.

V případě potřeby můžeme změnit nastavení přesnosti na nejvyšší přepnutím záložky **Accuracy Settings** na **High**, nyní ale bude stačit přednastavená hodnota **Medium**. Nastavení zdrojů **Source types** můžeme ponechat na **All ports** vzhledem k tomu že máme pouze jeden definovaný port. Jako vzorky frekvencí zaškrtneme naše vytvořené monitory a automatický typ. Pro pozdější průchody nebo až budeme mít více frekvenčních vzorků můžeme zaškrtnout **Use broadband and frequency sweep**. Simulaci spustíme tlačítkem **Start**.

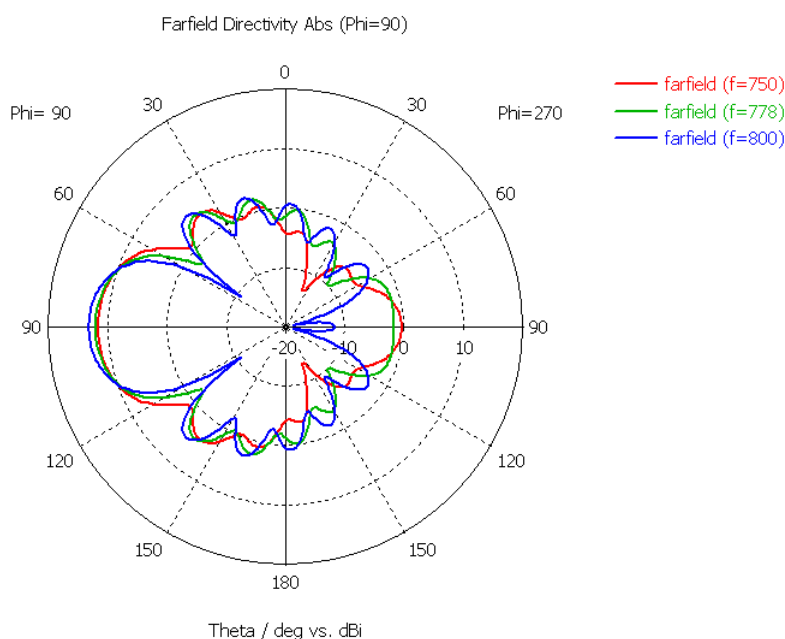
2.7 Výsledky simulace

Po úspěšném provedení simulace můžeme zkontrolovat výsledky dostupné v navigačním stromu ve složkách **1D Results**, **2D/3D Results** a složkách určených pro nastavené monitory.



Obrázek 75: 1D Results: S-Parameters před optimalizací.

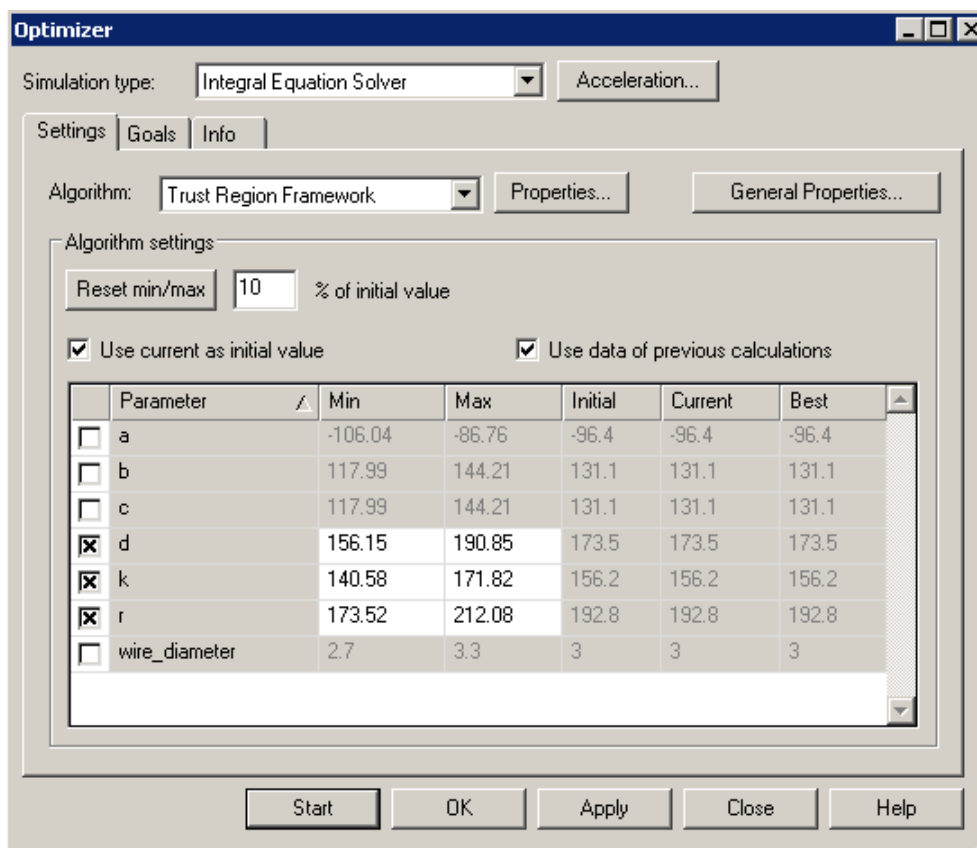
A také porovnat naše nastavené monitory vzdáleného pole ve složce **Farfield**. Zde máme na výběr zobrazit všechny výsledky jednotlivě ve složkách **farfield(f = X)** nebo ve složce **Farfield Cuts - Excitation - Phi=90** zobrazíme výsledky monitorů v jednom grafu.



Obrázek 76: Vzdálené pole pro 750, 778 a 800 MHz.

2.8 Optimalizace

Po první simulaci bude zapotřebí anténu ještě optimalizovat. Toto můžeme provést ze záložky **Simulation: Solver - Optimizer**.



Obrázek 77: Natavení optimalizace.

V záložce settings vybereme parametry které chceme použít pro optimalizaci. V našem případě volíme délky reflektoru, direktoru a dipólu. Také můžeme zaškrtnout možnost **Use data from previous calculations** a přesuneme se do záložky **Goals**.

Define Optimizer Goal

Result Name: 1DC: .\S-Parameters\S1,1

Type: ☐ Mag. (linear) ☒ Mag. (dB) ☐ Phase
☐ Real Part ☐ Imaginary Part

Conditions: Operator: move min Target: 778 Weight: 1.0
☐ Use slope Target (max): 0.0

Range: ☐ Total ☐ Single at: 0 ☒ Range min: 774 max: 782

Goal Norm: Maximum Difference

OK Cancel Result Template... Help

Obrázek 78: Nastavení cíle optimalizace.

Zde klikneme **Add a new goal** pro nastavení cíle optimalizace. V dialogovém okně zvolíme typ **Mag. dB** operaci posunutí minima **move min** na 778 MHz. Také můžeme nastavit rozpětí na 774 až 782 MHz, potvrdíme **OK** a spustíme optimalizaci.

```
Algorithm: Trust Region Framework
Number of evaluations: 2
(solver: 1, reloaded: 1)
Initial goal function value = 4 (reloaded)
Best goal function value = 0
Last goal function value = 0

Last solver evaluation time = 00:00:51 h

Best parameters so far:

d = 180.44
k = 156.2
r = 192.8

(Corresponding run ID: 3)
```

Obrázek 79: Výsledek optimalizace.

Optimalizace nám upraví hodnoty zvolaných parametrů. Můžeme pokračovat s dalšími procesy optimalizace dokud nejsem s výsledky simulace spokojen.

Reference

- [1] Understanding the diagrams of electromagnetic waves [online]. In: physics.stackexchange.com. Alexander. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/20331/understanding-the-diagrams-of-electromagnetic-waves>
- [2] Mesh Properties (CST 2015) [online]. In: csttutorial.blogspot.cz. 2015 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/20331/understanding-the-diagrams-of-electromagnetic-waves>
- [3] Z. RAIDA: 4.3 Yaggiho anténa. In: www.urel.feec.vutbr.cz [online]. [cit. 2017-02-15] <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=4-3-A>